



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**ZONIFICACIÓN FUNCIONAL PARA LA GESTIÓN
FORESTAL: CASO DE ESTUDIO SAN PEDRO EL
ALTO, OAXACA**

ELIZABETH SERRANO RAMÍREZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO. DE MÉXICO

2019



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe, “**Elizabeth Serrano Ramírez**”, Alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor “**Dr. J. René Valdez Lazalde**”, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “**Zonificación funcional para la gestión forestal: caso de estudio San Pedro El Alto, Oaxaca**”, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Texcoco, Estado de México a 30 de abril de 2019

Elizabeth Serrano Ramírez

Dr. J. René Valdez Lazalde

La presente tesis titulada: **“Zonificación funcional para la gestión forestal: caso de estudio San Pedro El Alto, Oaxaca”** realizada por la alumna: **“Elizabeth Serrano Ramírez”** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

Dr. J. René Valdez Lazalde

ASESOR

Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas

ASESOR

Dr. Roman Anselmo Mora Gutiérrez

ASESOR

Dr. Gregorio Ángeles Pérez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, abril de 2019

ZONIFICACIÓN FUNCIONAL PARA LA GESTIÓN FORESTAL: CASO DE ESTUDIO SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA.

Elizabeth Serrano Ramírez, M en C.

Colegio de Postgraduados, 2019.

RESUMEN

La planificación del manejo forestal requiere programar a detalle actividades en espacio y tiempo que permitan alcanzar objetivos económicos, ambientales y sociales. Para el propósito se utilizan diversas herramientas que permiten compatibilizar el cumplimiento de uno o más objetivos productivos, mientras se considera el potencial del bosque, las funciones ecosistémicas y la capacidad operativa de los gestores forestales. En el presente trabajo se propone un modelo de optimización basado en el enfoque de zonificación TRIAD, el cual sugiere dividir el área forestal bajo manejo en tres zonas: a) conservación, b) aprovechamiento maderable extensivo y c) aprovechamiento maderable intensivo, para maximizar el ingreso en términos de valor presente (VP), derivado del aprovechamiento forestal, y al mismo tiempo satisfacer restricciones operativas y de conservación de la biodiversidad. El modelo se implementó para el bosque bajo manejo de la comunidad de San Pedro El Alto, Oaxaca, México y fue resuelto mediante nueve técnicas heurísticas: búsqueda local simple (BLS), búsqueda local múltiple (BLM), multiarranque (MTA), tres técnicas híbridas conformadas por la técnica de recocido simulado en combinación con cada una de las anteriores mencionadas (RBLS, RBLM y RMTA), un algoritmo genético, en su versión simple (GNS), y dos variantes del mismo (GN2 y GN3 respectivamente). Los resultados obtenidos por cada técnica heurística fueron comparados entre sí y con plan de manejo actual definido por la comunidad de San Pedro El Alto. La técnica de recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS) presentó el mejor rendimiento para obtener soluciones factibles que maximizan el ingreso total en el horizonte de planeación a la par que se respetan los criterios de zonificación. En general, los resultados señalan que las técnicas heurísticas de búsqueda guiada responden eficientemente al problema definido.

Palabras clave: conservación de biodiversidad, manejo forestal, técnicas heurísticas, optimización, zonificación funcional, TRIAD.

FUNCTIONAL ZONING FOR FOREST MANAGEMENT: STUDY CASE OF SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA.

Elizabeth Serrano Ramírez, M en C.

Colegio de Postgraduados, 2019.

ABSTRACT

Forest management planning requires to program specific activities in space and time that allow meeting economic, environmental and social objectives. For this purpose, multiple tools are used to accomplish one or more productive objectives, considering the forest potential, ecosystem functions and the operative capacity of the landowners. In this work I propose a multiobjective optimization model based on the TRIAD zoning approach, which suggests dividing the forest under management into three zones types: a) biodiversity conservation, b) extensive timber production and c) intensive timber production, to maximize the present value (VP) of gains, derived from timber harvesting, while considering operative and conservation restrictions. The model was implemented for the managed forest owned by San Pedro El Alto community located in Oaxaca, Mexico. It was solved through nine heuristic techniques: local simple search (BLS), local beam search (BLM), multi-start (MTA), three hybrid techniques conformed by the simulated annealing technique in combination with each of the heuristics mentioned above (RBLS, RBLM, and RMTA), a genetic algorithm, in a simple version (GNS), and two variants of it (GN2 and GN3 respectively). The obtained results by each technique were compared among themselves and with the current forest management plan being carried out by the community of San Pedro El Alto. Simulated annealing with local simple search (RBLS), a hybrid technique, generated the best results, maximizing economic gains in the planning horizon while respecting the zoning criteria. In general, the results showed that techniques that use guided search respond efficiently to the defined problem.

Key words: biodiversity conservation, forest management planning, heuristic techniques, optimization, functional zoning, TRIAD.

DEDICATORIAS

A mis padres Vianey y Valentín, por todo su cariño y comprensión hacia mis metas, deseos y propósitos de vida tanto personal como profesional. Por el tiempo, apoyo y educación que me han brindado a lo largo de mi existencia para poder actuar de la mejor manera ante los parabienes y adversidades presentes en el día a día. Por su completa compañía tanto en momentos de angustia como de alegría y por demostrarme que el núcleo familiar es la clave de la felicidad.

A mis hermanas Estefanie, Vianney y Yotzelyn, por su paciencia y tolerancia ante los momentos de estrés y enojo producto de mi falta de carácter para afrontar situaciones no contempladas tanto en mi vida profesional como personal. Por brindarme momentos de goce y optimismo con su juventud floreciente y ánimo de disfrutar la vida al máximo.

A las familias Ramírez Mendoza y Serrano Mendoza, por sus comentarios de aliento y entusiasmo para lograr esta meta que hoy se da por cumplida.

A mis amigos, que sin importar la distancia han estado presentes con palabras de aliento y apoyo en esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, por haberme brindado la oportunidad de formar parte del grupo de becarios y financiar mis estudios de maestría. Especialmente al Posgrado en Ciencias Forestales, por el espacio y tiempo dispuesto para completar mi formación profesional y desarrollar este proyecto de investigación.

A la comunidad de San Pedro El Alto, Oaxaca y al Ing. Raúl M. Hernández Cortez, asesor técnico de la comunidad, ya que sin su interés, disposición y colaboración esta investigación no podría haberse llevado a cabo.

Al Dr. René Valdez Lazalde, en primer lugar, por aceptar ser mi Consejero durante mis estudios de maestría y despertar en mí el interés de trabajar en el área de optimización forestal; en segundo lugar, por siempre compartir sus vastos conocimientos y experiencias en beneficio de mi formación profesional. Por alentarme a participar en diferentes actividades de divulgación para compartir los beneficios de esta investigación y finalmente por su enorme paciencia, preciada amistad y la confianza brindada en todo momento hacia mi persona.

Al Héctor M. De los Santos Posadas, por ser un distintivo catedrático que siempre mostró pasión y destreza para compartir sus experiencias y conocimientos, con el fin de transmitir ese gusto y energía a sus alumnos. Por su gran iniciativa para diversificar mi formación al sugerir una estancia en la Universidad Autónoma Metropolitana, y sobre todo por su paciencia, consejos e invaluable amistad.

Al Dr. Roman Anselmo Mora Gutiérrez, por aceptar colaborar en este proyecto. Por su exhaustivo apoyo para realizar mi estancia en la Universidad Autónoma Metropolitana, su tolerancia y dedicación para introducirme al fascinante mundo de las técnicas heurísticas y la programación, por el tiempo dedicado al desarrollo de esta investigación y su apreciada amistad.

Al Dr. Gregorio Ángeles Pérez, por su confianza y distinguida amistad, por su gratificante curso que permite una educación integradora al fomentar la interacción investigador-naturaleza. Por las atinadas recomendaciones para enriquecer esta investigación y sobre todo por sus grandes esfuerzos para mi inclusión en actividades de investigación en el sector forestal en México.

Al Dr. Javier Ramírez Rodríguez, por haberme aceptado como estudiante de movilidad en el Posgrado en Optimización, y apoyarme en todos los trámites requeridos para mi estancia en la Universidad Autónoma Metropolitana; además de su amistad y agradable convivencia durante el VII CSMIO 2018.

Al Dr. Arnulfo Aldrete por su invaluable apoyo para concluir la obtención de grado, por la gran experiencia obtenida al tomar su curso y por su valiosa amistad.

Al Dr. Leopoldo Mohedano Caballero, por haber sugerido al Dr. René Valdez Lazalde como investigador destacado, para fungir como director de mi proyecto de maestría.

Al Dr. Alejandro Velázquez Martínez y al Dr. Aurelio M. Fierros González, por su valiosa amistad y consejos ofrecidos durante mi estancia en el Posgrado en Ciencias Forestales.

A mi novio Israel Gaytán Campos, por su cariño, comprensión y compañía en los momentos más agotadores de este proyecto y, por cuidar de mí y de mi familia siempre.

A mi mejor amiga Itzel Guadalupe Rendón Espíritu, por escucharme, apoyarme y recordarme que siempre podemos dar lo mejor de nosotros mismos.

A mis queridos amigos Alberto Rodríguez Sánchez y José Julio Santana González, por el tiempo y paciencia que dedicaron para mejorar mi comprensión en temas de programación y optimización.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
DEDICATORIAS	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
LISTA DE CUADROS	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Generalidades	1
Tendencias actuales del manejo forestal	2
Contexto a nivel mundial	2
Zonificación TRIAD	5
Contexto a nivel nacional	6
Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento de la Producción y Productividad (ENAIPROS)	7
Comunidades forestales en México	8
Manejo forestal comunal	8
Empresa forestal comunal San Pedro El Alto, Oaxaca	9
Descripción del área de estudio	11
Localización geográfica	11
Clima y precipitación	12
Suelos e hidrología	12
Flora y fauna	12
Objetivos	13
Objetivo general	13
Objetivos particulares	13
Literatura citada	14
CAPÍTULO I. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ZONIFICACIÓN FUNCIONAL DEL BOSQUE DE SAN PEDRO EL ALTO, ZIMATLÁN, OAXACA	23

1.1 Resumen	23
1.2 Abstract	24
1.3 Introducción	25
1.3.1 Modelos de optimización	25
1.3.1.1 Modelos de optimización con enfoque forestal	27
1.4 Materiales y métodos	29
1.4.1 Datos del modelo	29
1.4.2 Formulación del modelo	31
1.4.2.1 Supuestos de modelado	31
1.5 Resultados y discusión	32
1.5.1 Modelo matemático	32
1.5.1.1 Índices	32
1.5.1.2 Parámetros	32
1.5.1.3 Variables de decisión	33
1.5.1.4 Función objetivo y restricciones	34
1.6 Conclusiones	38
1.7 Literatura citada	39
CAPÍTULO II. TÉCNICAS HEURÍSTICAS PARA MODELOS DE OPTIMIZACIÓN	43
2.1 Resumen	43
2.2 Abstract	44
2.3 Introducción	45
2.4 Materiales y métodos	47
2.4.1 Formulación de la instancia	47
3.4.1.1 Supuestos de la instancia	47
2.4.1.2 Índices	50
2.4.1.3 Parámetros	50
2.4.1.4 Variables de decisión	54
2.4.2 Técnicas heurísticas	58
2.4.2.1 Búsqueda local simple	58
3.4.2.2 Búsqueda local múltiple	60

2.4.2.3 Multiarranque.....	61
2.4.3 Técnicas metaheurísticas	63
2.4.3.1 Recocido simulado	63
2.4.3.2 Algoritmos genéticos	65
2.5 Resultados y discusión	67
2.5.1 Modelo de la instancia.....	67
2.5.2 Codificación de la instancia	74
2.5.2.1 Operadores genéticos	75
2.5.2.2 Cruza	76
2.5.2.3 Mutación.....	76
2.5.2.4 Función de mejora.....	78
2.6 Conclusiones	80
2.7 Literatura citada	80
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE NUEVE HEURÍSTICAS PARA LA RESOLUCIÓN DEL MODELO DE ZONIFICACIÓN FUNCIONAL DEL BOSQUE DE SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA.....	87
3.1 Resumen	87
3.2 Abstract	88
3.3 Introducción.....	89
3.3.1 Heurísticos en la gestión forestal.....	89
3.4 Materiales y métodos	90
3.4.1 Implementación de técnicas heurísticas y metaheurísticas.....	90
3.4.1.1 Búsqueda local simple (BLS).....	92
3.4.1.2 Búsqueda local múltiple (BLM)	92
3.4.1.3 Multiarranque (MTA).....	93
3.4.1.4 Recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS)	94
3.4.1.5 Recocido simulado con búsqueda local múltiple (RBLM).....	95
3.4.1.6 Recocido simulado con multiarranque (RMTA).....	96
3.4.1.7 Algoritmo genético simple (GNS).....	97
3.4.1.8 Algoritmo genético de mutación múltiple (GN2).....	98
3.4.1.9 Algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo (GN3)	99

3.5 Resultados y discusión	100
3.5.1. Búsqueda local simple (BLS)	100
3.5.2 Búsqueda local múltiple (BLM)	103
3.5.3 Multiarranque (MTA)	106
3.5.4 Recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS)	109
3.5.5 Recocido simulado con búsqueda local múltiple (RBLM)	112
3.5.6 Recocido simulado con multiarranque (RMTA)	115
3.5.7 Algoritmo genético simple (GNS)	118
3.5.8 Algoritmo genético de mutación múltiple (GN2)	121
3.5.9 Algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo (GN3)	124
3.5.10 Comparación entre heurísticas	127
3.6 Conclusiones	134
3.7 Literatura citada	135
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
Tendencias actuales del manejo forestal	138
Modelos de optimización para la asignación eficiente de recursos forestales	140
Técnicas heurísticas en la gestión forestal	141
ANEXOS	142

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica BLS.	100
Cuadro 3.2 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica BLS.	101
Cuadro 3.3 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica BLM.	103
Cuadro 3.4 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica BLM.	104
Cuadro 3.5 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica MTA.	106
Cuadro 3.6 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica MTA.	107
Cuadro 3.7 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica RBLS.	109
Cuadro 3.8 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica RBLS. .	110
Cuadro 3.9 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica RBLM.	112
Cuadro 3.10 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica RBLM.	113
Cuadro 3.11 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica RMTA.	115
Cuadro 3.12 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica RMTA.	116
Cuadro 3.13 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica GNS.	118
Cuadro 3.14 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica GNS. .	119
Cuadro 3.15 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica GN2.	121
Cuadro 3.16 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica GN2.	122
Cuadro 3.17 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica GN3.	124
Cuadro 3.18 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica GN3.	125
Cuadro 3.19 Resumen de la prueba de medianas de Bootstrap (millones de pesos).	128
Cuadro 3.20 Valores obtenidos (millones de pesos) del proceso de experimentación.	129
Cuadro 3.21 Desviación de las soluciones obtenidas frente a la mejor solución conocida.	130
Cuadro 3.22 Resumen de las pruebas de rangos con signo de Wilcoxon.	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Colindancias municipales de San Pedro El Alto, Oaxaca.....	11
Figura 1.1 Proceso para la elaboración del modelo matemático.....	26
Figura 2.1 Pseudocódigo del algoritmo búsqueda local simple.....	59
Figura 2.2 Pseudocódigo del algoritmo búsqueda local múltiple.....	61
Figura 2.3 Pseudocódigo del algoritmo multiarranque.....	62
Figura 2.4 Pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado.....	64
Figura 2.5 Pseudocódigo del algoritmo genético.....	66
Figura 2.6 Codificación del vector solución para el modelo de optimización.....	75
Figura 2.7 Secciones permitidas del vector solución para ejecutar los operadores genéticos.	75
Figura 2.8 Proceso de cruce para generar nuevos individuos en la población.....	76
Figura 2.9 Opciones demutación en un solo punto.....	77
Figura 2.10 Opciones de mutación en tres puntos.....	78
Figura 2.11 Proceso de selección para conformar la nueva población.....	79
Figura 3.1 Ejemplo de codificación de la solución inicial y de una solución vecina.....	91
Figura 3.2 Pseudocódigo del algoritmo de búsqueda local simple.....	92
Figura 3.3 Pseudocódigo del algoritmo de búsqueda local múltiple.....	92
Figura 3.4 Pseudocódigo del algoritmo de multiarranque.....	93
Figura 3.5 Pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado con búsqueda local simple.....	94
Figura 3.6 Pseudocódigo del algoritmo de búsqueda local múltiple.....	95
Figura 3.7 Pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado con multiarranque.....	96
Figura 3.8 Pseudocódigo del algoritmo genético simple.....	97
Figura 3.9 Pseudocódigo del algoritmo genético con mutación múltiple.....	98
Figura 3.10 Pseudocódigo del algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo.....	99
Figura 3.11 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica BLS.	101

Figura 3.12 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica BLS.	102
Figura 3.13 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica BLM.	104
Figura 3.14 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica BLM.	105
Figura 3.15 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica MTA.	107
Figura 3.16 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica MTA.	108
Figura 3.17 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica RBLS.	110
Figura 3.18 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica RBLS.	111
Figura 3.19 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica RBLM.	113
Figura 3.20 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica RBLM.	114
Figura 3.21 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica RMTA.	116
Figura 3.22 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica RMTA.	117
Figura 3.23 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica GNS.	119
Figura 3.24 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica GNS.	120
Figura 3.25 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica GN2.	122

Figura 3.26 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica GN2.	123
Figura 3.27 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica GN3.	125
Figura 3.28 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica GN3.	126
Figura 3.29 Diagrama de cajas y bigotes de los ingresos obtenidos en el horizonte de planeación.	127
Figura 4.30 Distribución de las anualidades de cosecha y zonas TRIAD para a) escenario actual del PMF vigente de San Pedro El Alto, b) mejor solución obtenida por la técnica RBLS.	132

INTRODUCCIÓN GENERAL

Generalidades

México cuenta con un potencial importante para producir bienes y servicios ambientales. Particularmente, los bosques de clima templado nacionales son reconocidos a nivel mundial por presentar una gran diversidad de especies de alto valor comercial y ecológico (Bray *et al.*, 2006; Galicia y Zarco, 2014). Además, el país es reconocido a nivel internacional por el manejo forestal que realizan los ejidos y las comunidades, bajo una visión vanguardista de producción con enfoque de conservación (López, 2005; Galicia *et al.* 2015).

A pesar del reconocimiento, y del hecho que el manejo forestal comunitario¹ en México se distingue por realizar actividades de cosecha sostenible a favor de los servicios ecosistémicos que proporcionan los bosques, el enfoque de aprovechamiento, en general, tiene propósitos de subsistencia, lo cual difiere con la necesidad de aumentar la producción en el país para satisfacer la demanda actual de productos maderables y no maderables. Esto propicia incertidumbre respecto a la estructura adecuada de las áreas de aprovechamiento, así como los propósitos y regímenes de cultivo que permitan la sostenibilidad del proceso productivo (Bray *et al.*, 2003; Bray *et al.*, 2006).

La incorporación de conceptos como “sostenibilidad” o “aprovechamiento sostenible” en el marco de gestión de bosques ha generado creciente interés mundial en el desarrollo de nuevos enfoques y técnicas que permitan conciliar la actividad forestal productiva con requerimientos ecológicos y sociales (Torres, 2000; Messier y Puettmann, 2011; Galicia y Zarco, 2014). Los nuevos enfoques buscan responder a las necesidades de productos maderables y no maderables, que la industria forestal demanda, sin dejar de lado la conservación de los ecosistemas (Galicia *et al.*, 2015; Ruiz y Galicia, 2016). La circunstancia actual de México en materia forestal presenta una gran oportunidad para ensayar un enfoque de gestión que fomente la competitividad en la producción de madera, y al mismo tiempo

¹ Estructura conceptual para describir un manejo forestal que asegure la salud y productividad del bosque en el largo plazo y que a la vez proporcione un flujo continuo de beneficios sociales y económicos para toda la sociedad y en particular para las comunidades locales (Torres, 2000).

permita la continuidad de los bienes y servicios que los recursos forestales proporcionan, incrementando la participación del sector forestal en la economía nacional e internacional (Galicia *et al.*, 2013; Galicia *et al.* 2015). Tal ensayo es propósito de este trabajo y se realiza en el marco del concepto conocido como zonificación funcional (Galicia *et al.* 2015; Tittler *et al.*, 2016).

Tendencias actuales del manejo forestal

Contexto a nivel mundial

Los bosques cubren aproximadamente el 30% de la superficie terrestre y proporcionan bienes y servicios esenciales como alimentos, agua, refugio, ciclos de nutrientes, entre otros, y desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad (MacDicken *et al.*, 2015; Morales *et al.*, 2015). Además, se estima que cerca de 410 millones de personas dependen directamente del ingreso derivado del aprovechamiento del bosque y cerca de 1.6 billones dependen de los bienes y servicios que estos proporcionan (Köhl *et al.*, 2015). De acuerdo con Birdsey y Pan (2015), 30% de los bosques a nivel mundial son utilizados principalmente para producir bienes maderables y no maderables. En cuanto a su importancia económica, Köhl *et al.* (2015) mencionan que el comercio de madera y otros productos forestales manufacturados aportan más de \$450 mil millones de dólares a la economía mundial.

Por siglos, el manejo forestal se ha basado en el principio de rendimiento sostenido, el cual establece que el volumen de madera cosechada no debe de exceder el volumen producido en un periodo de tiempo definido (Wijewardana, 2008). Lo anterior funciona, si y solo si se reconoce a la madera como único beneficio del bosque. Sin embargo, en años recientes, la demanda de otras necesidades sociales y de los lineamientos y la normatividad sobre la producción y la protección ambiental han impulsado el diseño y desarrollo de nuevas estrategias de aprovechamiento de los recursos forestales, procurando que además de obtener un retorno económico rentable, se satisfagan las demandas sociales sin comprometer las funciones ecológicas del bosque (Bicknell *et al.*, 2015; Simula, 2017; Uhde *et al.*, 2017; Skutsch *et al.*, 2018).

El manejo forestal retoma diferentes puntos de vista a nivel mundial consecuencia de la diversidad de contextos económicos, ecológicos y sociales (Birdsey y Pan, 2015). Por lo tanto, es preciso considerar que no existe una estrategia de aprovechamiento universal capaz de responder a las todas las demandas existentes en cada nación. A continuación, se analizan las características de manejo forestal en algunas regiones del mundo:

1. En Australia las decisiones en silvicultura están guiadas por el tipo de bosque y su capacidad de regeneración, además de la necesidad de proteger áreas de alto valor de conservación, áreas con suelos sensibles y áreas con un valor social o cultural significativo (Bettinger *et al.*, 2017).
2. En Europa, los planificadores forestales han identificado la correspondencia entre los puntos de oferta y demanda, lo que ha permitido diseñar un plan capaz de administrar, conservar y proteger sus recursos mientras se asegura un rendimiento sostenible (Bettinger *et al.*, 2017; Mobtaker *et al.*, 2018).
3. Asia se caracteriza por utilizar un plan de manejo gubernamental que enumera a los pueblos a los que se les permite cosechar madera cada año, con la finalidad de brindar orientación general en las actividades silvícolas y otras actividades relacionadas con los recursos naturales (Bettinger *et al.*, 2017).
4. En África, el manejo forestal involucra a las partes interesadas asociadas con el aprovechamiento forestal, fomentando las reuniones con expertos en gestión para orientar las actividades silvícolas y determinar un nivel de producción económicamente rentable y de mínimo impacto ambiental (Bettinger *et al.*, 2017).
5. En Norteamérica el manejo forestal involucra procesos de planificación que permite proyectar los volúmenes de cosecha, por grado de producto, demanda de productos finales y las diferentes actividades de manejo. Además, se caracteriza por realizar monitoreos e inspecciones anuales de las actividades, lo que permite identificar

posibles desviaciones de los objetivos de sostenibilidad forestal y del camino deseado para un bosque regulado (Bettinger *et al.*, 2017; Mobtaker *et al.*, 2018).

6. En América Latina, el manejo forestal pretende un flujo alternativo de ingresos, a partir de la cosecha de productos forestales y la utilización de materiales de desecho (Bettinger *et al.*, 2017). La principal estrategia considerada para potencializar el aprovechamiento forestal es el desarrollo de empresas forestales comunitarias, en donde México y algunos países de América Central son los más avanzados en la promoción de estas (Lujan *et al.*, 2016). Sin embargo, a pesar de que existen experiencias positivas de un manejo forestal sostenible dirigidos principalmente por grupos comunitarios, el aprovechamiento continúa practicándose como una actividad aislada de la conservación del bosque (Campos y Villalobos, 2008).

En el presente trabajo se emplea la definición de manejo forestal sostenible², como una estrategia de manejo de recursos naturales, en la cual las actividades forestales se contextúan en las interacciones ecológicas, económicas y sociales, con el fin de obtener múltiples productos como madera, productos forestales no maderables y servicios ambientales. Esta definición ha surgido como alternativa preferible a los modelos de manejo forestal de uso singular, donde generalmente se busca la producción de madera (Nasi *et al.*, 2012; Aguirre, 2015).

Es importante resaltar que el recurso forestal es un objeto dinámico, por lo tanto, el manejo forestal sostenible debe asumir como punto clave la planificación para la gestión de los recursos naturales, financieros y del potencial humano, así como su expresión en las políticas a nivel internacional y de estados, además de asegurar la productividad, la calidad ambiental

² Se retoma el concepto de sostenibilidad, debido a que la SEMARNAT (2017) define que el concepto sustentable aplica en la argumentación para explicar o defender razones, en tanto que lo sostenible refiere a lo que se puede mantener durante largo tiempo sin agotar los recursos disponibles a futuro.

y conservación de biodiversidad (Eriksson y Hammer, 2006; Campos y Villalobos, 2008; Cué, 2013; Golladay *et al.*, 2016).

Zonificación TRIAD

El creciente interés por el mantenimiento de la biodiversidad y otros servicios que proveen los ecosistemas forestales (Bruggeman *et al.*, 2015), además de la valoración de estrategias internacionales para el desarrollo sostenible y la conservación, han direccionado el enfoque de planificación del sector forestal a una producción multiobjetivo considerando aspectos económicos, sociales y ecológicos (Campos y Villalobos, 2008; Messier y Puettmann, 2011; Mawengkang y Mawengkang, 2015).

De acuerdo con Ward y Erdle (2015), una alternativa que se apega a este enfoque es el aprovechamiento forestal a través de una zonificación TRIAD (triada). Esta zonificación corresponde a la estrategia propuesta por Seymour y Hunter en 1992, la cual propone dividir el territorio forestal bajo gestión en tres zonas, cada una designada en función de las prioridades y objetivos de producción establecidos (Xia *et al.*, 2014).

La primera zona propuesta corresponde a un área de conservación. En esta el objetivo es conservar la biodiversidad nativa del bosque bajo manejo y de las funciones y procesos ecosistémicos del mismo, por ende, no se permite el aprovechamiento, y las actividades humanas deben estar limitadas a la no interferencia con el objetivo de la zona. La segunda zona se establece como de aprovechamiento extensivo. En esta el objetivo es preservar la resiliencia y adaptabilidad del bosque en su biodiversidad nativa, al mismo tiempo que se permite la extracción de productos maderables a baja intensidad, aprovechando aquella madera disponible por efecto de disturbios naturales (Seymour y Hunter, 1999).

Por último, la tercera zona se define como de aprovechamiento intensivo. Tiene como objetivo satisfacer las demandas de insumos por parte de la industria forestal, en donde el nivel de aprovechamiento compensará la madera no cosechada en las otras dos zonas. Lo anterior parte del supuesto de que la protección de los valores de la biodiversidad no necesitan estar presentes en cada hectárea del bosque, pues ciertas consecuencias ambientales

resultantes del manejo intensivo son permisibles en las zonas de aprovechamiento, dando operatividad al sistema (Montigny y Maclean, 2006; Gustafsson *et al.*, 2012; Galicia *et al.* 2015).

El enfoque TRIAD, popularmente usado en Canadá, es aplicable a cualquier masa forestal y se ha convertido en un concepto atractivo para el manejo de los recursos forestales, debido a que involucra la protección de valores ecosistémicos a nivel paisaje permitiendo maximizar la productividad de los bosques, así como satisfacer a la industria forestal y a los ciudadanos conscientes del medio ambiente (Messier *et al.*, 2009; Anderson *et al.*, 2012; Tittler *et al.*, 2015).

Contexto a nivel nacional

Los bosques y selvas en México cubren el 32.75% del territorio nacional abarcando un total de 63.6 millones de hectáreas (Bray *et al.*, 2005). A pesar que esta superficie cubre solo el 1% de la superficie terrestre, contiene aproximadamente una décima parte de todos los vertebrados terrestres y plantas conocidas actualmente (Bray *et al.*, 2005). La producción forestal en México en su mayoría está a cargo del sector forestal comunitario, el cual probablemente sea el más grande del mundo (Antinori, 2005), pues la propiedad comunal de los bosques es mucho más extensa que en cualquier otro país, y este tipo de tenencia de la tierra es relativamente segura (Klooster y Ambinakudige, 2005).

La gestión forestal comunitaria es una estrategia que ha logrado compaginar exigencias ambientales con las socioeconómicas tanto a nivel nacional como internacional; además, este esquema aprovecha la organización familiar, comunal y regional, formando un sistema en el que los tres niveles de organización dependen mutuamente y obligan a una participación dinámica para el manejo de los recursos forestales (Chapela, 2005; Barsimantov y Kendall; 2012).

A partir de 1994 se ha impulsado en México el concepto de certificación forestal como un mecanismo para estimular la conservación y protección del recurso forestal además de la generación de ingresos para las comunidades locales; pues se calcula que alrededor de 12 millones de personas viven en las áreas forestales del país (Anta, 2006). Los principales

sistemas de planificación de la actividad silvícola utilizados en México para bosques de coníferas son: el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y el Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI). Mientras que, para los bosques tropicales, los sistemas utilizados corresponden a la selección en su mayoría de especies de mayor valor comercial (Anta, 2006; Anzures *et al.*, 2017). En cuanto a las intervenciones del gobierno federal en el sector forestal, estas son únicamente de tipo regulatorio. A través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se administran las políticas para la gestión forestal a nivel nacional; y por medio de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) se promueven actividades y proporcionan subsidios relacionados con el uso sostenible de los bosques, la protección de los bosques, el desarrollo de plantaciones y la restauración (Merino y Segura, 2005; Anta, 2006).

A pesar del potencial productivo alto del recurso forestal en México, este se encuentra subutilizado principalmente por la ineficiencia del sector, pues la falta de infraestructura y tecnología impide maximizar el aprovechamiento de los recursos (Anzures *et al.*, 2017). La producción de madera en el país no es competitiva a nivel internacional debido a altos costos de producción al no contemplar la ubicación estratégica de las áreas con mayor potencial productivo y por el costo de los planes de manejo para comunidades con áreas forestales relativamente pequeñas (Klooster y Masera, 2000). Por lo tanto, la producción forestal representa un rol pequeño en la economía de México (Bray *et al.*, 2005).

Los retos actuales que enfrenta el sector forestal en México implican realizar una efectiva coordinación entre el aprovechamiento forestal y las políticas de conservación, además de desarrollar sistemas capaces de evaluar los impactos sociales y económicos de las actividades forestales (Gerez y Alatorre, 2005; Merino y Segura, 2005).

Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento de la Producción y Productividad (ENAIPROS)

En seguimiento al Programa Nacional Forestal 2014-2018, el Gobierno Federal a través de la CONAFOR ha establecido una política nacional de reactivación de la producción

denominada ENAIPROS. El objetivo de ésta es fomentar el aprovechamiento sostenible de los ecosistemas forestales y tiene como meta principal incrementar en 86% la producción maderable del país.

El reto principal consiste en incrementar la tasa de crecimiento anual de 1.8 m³ a 4.7 m³ por hectárea en áreas bajo manejo autorizado, para una producción anual de 11 millones de m³ sin poner en riesgo la conservación de biodiversidad (CONAFOR, 2009). En el aspecto social la ENAIPROS busca facilitar el desarrollo comunitario y de capacidades locales empresariales para los propietarios forestales; lo anterior con el fin de generar capital social y humano que fortalezca el manejo sostenible de los recursos forestales. Para garantizar la sostenibilidad de la ENAIPROS, se consideraron dos garantías ambientales principales correspondientes a la conservación de la biodiversidad y certificación de manejo forestal (Mendoza, 2015; COIRENAT, 2016; Hernández, 2016).

La ENAIPROS fue impulsada a través de la delimitación de 17 zonas denominadas "Zonas de Reactivación de la Producción y Productividad Forestal" en los estados con mayor producción forestal: Chihuahua, Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala y Veracruz, ya que tales estados suministran el 90% de la producción forestal maderera actual del país. Así mismo, en apoyo a la ENAIPROS, la CONAFOR en coordinación con las entidades federativas, seleccionó a los territorios de mayor potencial para la producción forestal considerando sus condiciones naturales, sociales, económicas y de las cuencas de abasto. Se definieron 214 Unidades de Manejo Forestal en todo el país (UMAFORES) y estas representan el área base para la planeación del uso eficiente de los recursos forestales (CONAFOR, 2014; Pérez, 2016).

Comunidades forestales en México

Manejo forestal comunal

El enfoque de aprovechamiento en la mayoría de las comunidades y ejidos forestales de México tiene propósitos de subsistencia y de conservación de los recursos a través de conocimientos tradicionales y regímenes culturales, lo cual contrasta con la necesidad de mayor producción en el país para satisfacer la demanda actual de productos derivados de la

madera. Buena parte de los bosques bajo manejo son dirigidos por comunidades en México, tanto en áreas templadas como tropicales, y parecen estar a una escala y nivel de madurez inigualables en cualquier parte del mundo (Bray *et al.*, 2003).

Las comunidades forestales en México son diferentes a las existentes en otras latitudes, ya que los miembros de las comunidades tienen dominio pleno y control sobre la tierra que usufructúan (tienen el derecho de usarla y gozarla) según se especifica en la Ley Agraria del país (Fuente y Barkin, 2011; de los Santos *et al.*, 2015).

A nivel nacional las comunidades forestales aportan aproximadamente 80% del total de la producción de madera, y alrededor de 740 comunidades tienen el registro necesario para producir madera a partir de sus propios recursos. Sin embargo, aproximadamente el 43% de ellas son propietarias de una superficie promedio de 2,100 ha (Bray *et al.*, 2003; Klooster y Ambinakudige, 2005; de los Santos *et al.*, 2015), lo que conlleva a que la extracción de madera, en el mejor de los casos, sea una actividad temporal con bajos retornos económicos. Por otra parte, el 57% restante de las comunidades han logrado conformar empresas forestales comunitarias, y han demostrado su capacidad de transición hacia mercados internacionales más competitivos, implementando nuevas medidas para mantener la productividad forestal, la biodiversidad y la cubierta forestal en sus predios (Bray *et al.*, 2003; Bray *et al.*, 2006; de los Santos *et al.*, 2015).

Empresa forestal comunal San Pedro El Alto, Oaxaca

La comunidad forestal de San Pedro El Alto, es una de las comunidades más grandes del estado (INECC, 2007) y está reconocida como caso de éxito comunitario para superar condiciones de marginación y a la par ejercer un manejo forestal sostenible certificado a nivel internacional (Porter-Bolland *et al.*, 2011; Rosas y Lara, 2013b; De los Santos *et al.*, 2015). San Pedro El Alto se hizo cargo de la gestión de sus recursos forestales desde 1984, a partir de la creación de una empresa comunal forestal que aprovecha de manera redituable sus recursos forestales (Leyva, 2010). Actualmente la superficie bajo manejo forestal corresponde a 13,829.64 hectáreas del total de la superficie de la comunidad, y produce el 10 % de la madera que abastece al estado de Oaxaca en productos para papel, madera aserrada y leña (Macera *et al.*, 1997; Rosas y Lara, 2013a; de los Santos *et al.*, 2015). La comunidad cuenta

con la certificación de manejo forestal sostenible emitida por la organización internacional Rainforest Alliance desde 2001; lo que le proporciona un aumento en el valor de sus productos (Rosas y Lara, 2013a; de los Santos *et al.*, 2015).

En 1950 el volumen maderable autorizado para extracción correspondía a 32,719 m³ anuales, y para 2017 el volumen autorizado incrementó a 100 000 m³ anuales. De este volumen, aproximadamente 20 000 m³ son procesados en el aserradero comunal; lo que genera un ingreso cercano a 20 millones de pesos anuales (CCMSS, 2017; Garibay, 2007). El manejo forestal vigente es realizado acorde con los principios establecidos por el “Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola” (SICODESI) para masas regulares, considerando un turno de 50 años y un ciclo de corta de 10 años. El SICODESI es un método de ordenación a través del cual se hace una planeación del manejo forestal para lograr un bosque que pueda aprovecharse en forma óptima y permanente (Jayo, 2007).

Los tratamientos silvícolas aplicados corresponden a: corta de regeneración por árboles padres (individuos con las mejores características morfológicas que regenerarán la masa forestal), corta de liberación y actividades de aclareo comercial y no comercial. Dichos tratamientos han sido ejercidos desde hace 30 años y consideran las características de edad, densidad, tolerancia e intolerancia de las especies arbóreas presentes en cada rodal muestreado.

A pesar de que la comunidad ha destacado por realizar actividades de conservación a través de un manejo sostenible de sus recursos forestales, aun no ha determinado a través de un procedimiento sistematizado, una estrategia de inventario mínimo que pueda mejorar los ingresos de la comunidad e incrementar la flexibilidad del plan de manejo (de los Santos *et al.*, 2015; Leyva, 2010). De acuerdo con de los Santos *et al.* (2015) el rango de edades del bosque en la comunidad se encuentra entre los 50-80 años, lo que indica que el bosque presenta un superávit de materia prima; y al cosechar únicamente 100 000 m³ de una

posibilidad cerca de los 200 000 m³ anuales³, la comunidad está dejando “recurso almacenado” en el bosque. Lo anterior puede considerarse como una estrategia de manejo ineficiente desde el punto de vista financiero y riesgoso en términos de salud forestal, sin embargo, también puede ser considerado como una estrategia de conservación del recurso forestal.

Descripción del área de estudio

Localización geográfica

La comunidad de San Pedro El Alto pertenece al municipio de Zimatlán de Álvarez (Figura 1) en Oaxaca. Esta se ubica en las coordenadas geográficas 16° 35'13'' y 16°50'18'' Latitud Norte y 97° 00'56'' y 97° 12'22'' Longitud Oeste, y cuenta con una superficie de 29,682.11 hectáreas.

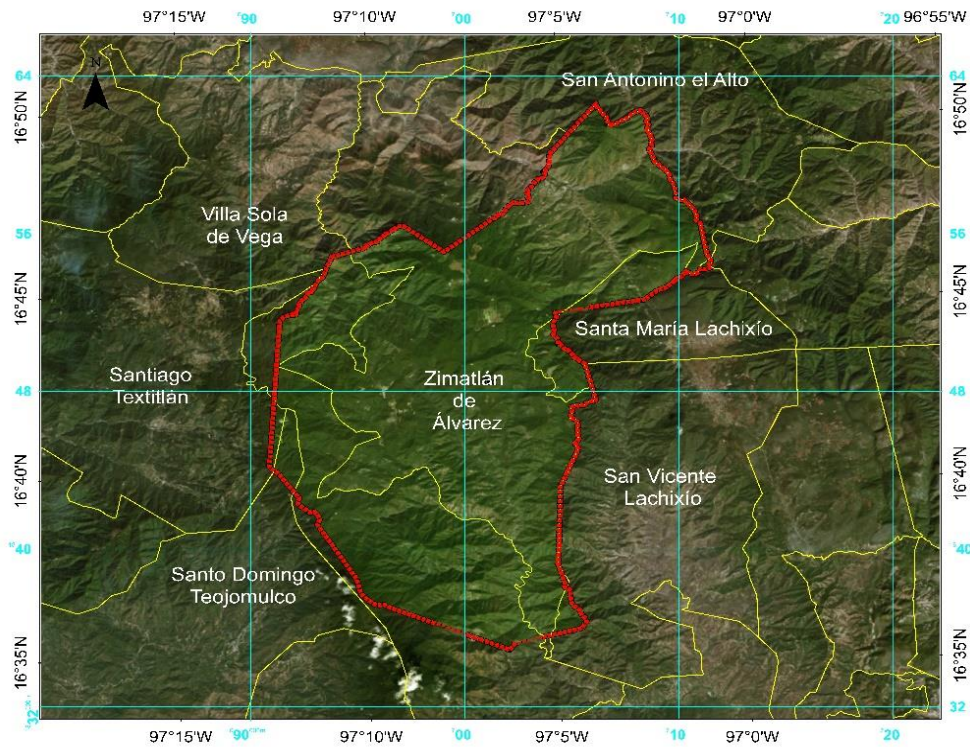


Figura 1 Colindancias municipales de San Pedro El Alto, Oaxaca.

³ Cifra estimada para la superficie forestal bajo manejo en San Pedro El Alto, a partir del incremento medio anual (6.7 m³/ha) reportado en el Plan de Manejo Forestal 2016-2017/2025-2026 de la comunidad.

Clima y precipitación

La comunidad se localiza en los límites de las regiones Sierra Sur y Valles Centrales del estado de Oaxaca, el territorio es montañoso y presenta un gradiente altitudinal que va de los 1900 hasta los 3000 msnm.

El centro del predio se caracteriza por presentar pendientes moderadas y laderas con pendientes pronunciadas con orientaciones norte y sur (INECC, 2007; Leyva *et al.*, 2010; Cortés, 2014). Los tipos de clima presentes en el área son: templado subhúmedo con lluvias en verano “C(m) (w)”, templado húmedo “C(w2) (w)” y semicálido subhúmedo “A(C) w2 (w)” (INEGI, 2005; Cortes, 2014). El clima predominante es templado subhúmedo con un rango de temperatura media anual de 12 a 18 °C y precipitación anual de 200 a 1 800 mm (Aldape y Santos, 2016a; Aldape y Santos, 2016b).

Suelos e hidrología

De acuerdo a la carta edafológica de INEGI (2004) el tipo de suelo presente en el área es de tipo Litosol (l) y Regosol eútrico (Re). En su mayoría el suelo es somero, y la fertilidad natural y susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales. El predio no cuenta con cuerpos de agua, pero si acceso a los ríos: San Pedro, Las Huertas, Lobo y Salinas.

Flora y fauna

Resultado de las condiciones climáticas y las características de sus suelos, los bosques de la comunidad son en su mayoría de tipo templado, compuestos de diferentes especies de pinos tales como: *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *P. montezumae*, *P. patula*, *P. douglasiana*, *P. pringlei*, *P. devoniana*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa* y *P. teocote*. También se encuentran presente *Abies religiosa* y especies de encino como *Quercus conspersa* y *Quercus rugosa* (Bartolo, 2011; Rosas & Lara, 2013a). Aproximadamente el 70% de la cobertura forestal está representada por el género *Pinus* (Aldape y Santos, 2016b). Conforme al Plan de Manejo Forestal (2016-2026) de la comunidad, la fauna registrada en las partes altas del predio corresponde principalmente a salamandras, búhos (*Glaucidium gnoma*) y ardillas voladoras (*Glaucomys volans*); mientras que en las partes bajas se han registrado lagartijas (*Sceloporus*

formosus), zopilotes de cabeza negra (*Coragyps atratus*), coyotes (*Canis latrans*) y venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*).

Objetivos

Considerando la necesidad de generar un procedimiento sistematizado que permita realizar una gestión sostenible del bosque, de tal manera que se incremente el ingreso económico en la comunidad de San Pedro El Alto, se plantearon los siguientes objetivos:

Objetivo general

Maximizar la ganancia económica en la comunidad de San Pedro El Alto, Oaxaca; producto del aprovechamiento forestal, mediante la zonificación funcional del bosque implementando la estrategia de zonificación “TRIAD”.

Objetivos particulares

- Describir las condiciones actuales de manejo y gestión del bosque en la comunidad forestal de San Pedro El Alto, Oaxaca.
- Proponer un modelo matemático que permita optimizar el uso del recurso forestal en San Pedro El Alto, maximizando la ganancia económica en términos del valor presente (VP) derivado del aprovechamiento forestal; a través del enfoque de zonificación “TRIAD”.
- Evaluar la propuesta de zonificación forestal funcional en el cumplimiento de los objetivos definidos por la “Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento de la Producción y Productividad” y con las metas de producción y conservación de la comunidad.

Literatura citada

- Aldape L., C.T. y A. Santos M. 2016a. Ampliación de la distribución geográfica de *Abronia oaxacae* (Squamata: Anguidae) y *Tantalophis discolor* (Squamata: Colubridae) en el estado de Oaxaca, México. *Acta Zoológica Mexicana* 32: 116-119.
- Aldape L., C.T. y A. Santos M. 2016b. Efecto del manejo forestal en la herpetofauna de un bosque templado del occidente de Oaxaca, México. *Revista Biológica Tropical* 64: 931-943.
- Aguirre C., O.A. 2015. Manejo forestal en el siglo XX. *Madera y Bosques* 21: 17-28.
- Anderson, J.A., G.W. Armstrong, M.K. Luckert and W.L. Adamowicz. 2012. Optimal zoning of forested land considering the contribution of exotic plantations. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences* 4: 92-104.
- Anta, F.S. 2006. Forest certification in Mexico. *In: Cashore B., Gale F. (eds.). Confronting sustainability: forest certification in developing and transitioning countries. Report Number 8. Yale School of Forestry and Environmental Studies, Connecticut. pp: 407-434.*
- Antinori, C. 2005. Vertical integration in the community forestry enterprises of Oaxaca. *In: Bray D.B., Merino P.L., Barry D. (eds.). The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes. University of Texas, Texas. pp: 241-272.*
- Anzures C., F., M. Acosta M., E. Flores A., J.M. Torres R., D.M. Sargerman J., L. González M. y E. Buendía R. 2017. Caracterización de productores forestales en 12 estados de la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 1562-1573.
- Bartolo R., R.A. 2011. Revisión teórica del capital social y su aplicación en la empresa forestal comunitaria: el caso de San Pedro El Alto, Zimatlán. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. México. 130 p.
- Barsimantov, J. y J. Kendall. 2012. Community forestry, common property, and deforestation in eight Mexican states. *Journal of Environmental & Development*. 21: 414-437.
- Bettinger, P., K. Boston, J.P. Siry y D.L. Grebner. 2017. Management of forests and natural resources. *In: Bettinger P., K. Boston, J.P. Siry, D.L. Grebner. (eds). Forest Management and Planning. 2nd edition. Academic Press, New York. pp: 1-20.*

- Bicknell, J. E., M.J. Struebig and Z.G. Davies. 2015. Reconciling timber extraction with biodiversity conservation in tropical forest using reduced-impact logging. *Journal of Applied Ecology* 52: 379-388.
- Birdsey, R. e Y. Pan. 2015. Trends in management of the world's forests and impacts on carbon stocks. *Forest Ecology and Management* 355: 83-90.
- Bray, D.B., L. Merino P., P. Negreros C., G. Segura, J.M. Torres R. and H.F.M. Vester. 2003. Mexico's community-managed forests as a global model for sustainable landscapes. *Conservation Biology* 17: 672–677.
- Bray, D.B., L. Merino P. and D. Barry. 2005. Community managed in the strong sense of the phrase: the community forest enterprises of Mexico. *In: Bray D.B., Merino P.L., Barry D. (eds.). The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes. University of Texas, Texas. pp: 3-26.*
- Bray, D.B., C. Antinori y J.M. Torres R. 2006. The Mexican model of community forest management: The role of agrarian policy, forest policy and entrepreneurial organization. *Forest Policy and Economics* 8: 470–484.
- Bruggeman, D., P. Meyfroidt and E.F. Lambin. 2015. Production forests as a conservation tool: Effectiveness of Cameroon's land use zoning policy. *Land Use Policy* 42: 151-164.
- Campos, J y R. Villalobos. 2008. Manejo forestal a escala paisaje: un enfoque para satisfacer múltiples demandas de la sociedad hacia el sector forestal. *Ciencia e Investigación Forestal* 14: 181-199.
- CCMSS (Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible). 2017. San Pedro El Alto, Oaxaca: gigante ejemplar del manejo forestal comunitario. Blog del Consejo Civil Mexicano. [en línea]. Consultado: 12 de junio de 2017. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/431/cap10.html>.
- Chapela, F. 2005. Indigenous community forest management in the Sierra Juárez, Oaxaca. *In: Bray D.B., Merino P.L., Barry D. (eds.). The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes. University of Texas, Texas. pp: 91-110.*
- COIRENAT (Consejo Internacional de Recursos Naturales). 2016. Memorias del IV Congreso Internacional de Recursos Naturales. Consejo Internacional de Recursos Naturales y Vida Silvestre A.C. 344 p.

- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2009. Estudio Regional Forestal: Unidad de Manejo Forestal Regional No. 2012 Sierra Sur. Comisión Nacional Forestal México. 478 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2014. Programas específicos de intervención institucional: Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento en la Producción y Productividad 2013-2018. Comisión Nacional Forestal. México. 32 p.
- Cortés V., G.I. 2014. Aplicación de la planeación estratégica a la empresa forestal comunal de San Pedro El Alto, Zimatlán, Oaxaca. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México. 45 p.
- Cué G., J.L. 2013. Criterios e indicadores del manejo forestal: una alternativa para su monitoreo. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. 3: 183-193.
- de los Santos P., H.M., J.R. Valdez L. and J.M. Torres R. 2015. San Pedro El Alto Community forest, Oaxaca, Mexico. *In: Siry J.P., Bettinger P., Merry K., Grebner D.L., Bostons K. and Cieszewski C. (eds). Forest Plans of North America*. Elsevier, London. pp: 199–208.
- Eriksson, S. and M. Hammer. 2006. The challenge of combining timber production and biodiversity conservation for long-term ecosystem functioning-A case study of Swedish boreal forestry. *Forest Ecology and Management* 237: 208-217.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2009. Contribución de los criterios e indicadores hacia la sostenibilidad del manejo forestal: El caso de Ecuador. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma. 53 p.
- Fuente C., M.E. y D. Barkin. 2011. Concesiones forestales, exclusión y sustentabilidad: Lecciones desde las comunidades de la Sierra Norte de Oaxaca. *Desacatos* 1: 93-110.
- Galicia, L., L. Gómez M. and V. Magaña. 2013. Climate change impacts and adaptation strategies in temperate forests in Central Mexico: a participatory approach. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 22 p.
- Galicia, L. and A.E. Zarco A. 2014. Multiple ecosystem services, possible trade-offs and

- synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 10: 275–288.
- Galicia, L., C. Potvin y C. Messier. 2015. Maintaining the high diversity of pine and oak species in Mexican temperate forests: a new management approach combining functional zoning and ecosystem adaptability. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 1358–1368.
- Garibay, C. 2007. El dilema corporativo del comunalismo forestal. *Desacatos* 1: 251-274.
- Gerez F., P. and E. Alatorre G. 2005. Challenges for forest certification and community forestry in Mexico. *In: Bray D.B., Merino P.L., Barry D. (eds.). The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes. University of Texas, Texas. pp: 71-88.*
- Golladay, S.W., K.L. Martin, J.M. Vose, D.N. Wear, A.P. Covich, R.J. Hobbs, K.D. Klepzing, G.E. Likens, R.J. Naiman and A.W. Shearer. 2016. Achievable future conditions as a framework for guiding Forest conservation and management. *Forest Ecology and Management* 360: 80-96.
- Gustafsson, L., S.C. Baker, J. Bauhus, W.J. Beese, A. Brodie, J. Kouki, D.B. Lindenmayer, A. Lohmus, G. Martínez, C. Messier, M. Neyland, B. Palik, A. Sverdrup W., J.A. Volney, A. Wayne y J.F. Franklin. 2012. Retention forestry to maintain multifunctional forests: A world perspective. *BioScience* 62: 633–645.
- Hernandez M., J. 2016. National Strategy to Increase Forest Production. *In: APFNet Workshop on Forestry and Rural Livelihood Development. 1-14 Noviembre 2016. Negombo, Sri Lanka. pp: 42–51.*
- INEEC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2007. Capítulo 10. Publicaciones [en línea]. Consultado: 01 de junio de 2018. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/431/cap10.html>.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2004. Guía para la interpretación de cartografía: edafología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 8 p.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2005. Guía para la interpretación de cartografía: climatología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 21 p.

- Jayo C., A. 2007. Estudio para la optimización del sistema de extracción de recursos forestales maderables en la comunidad de Ixtlán de Juárez, municipio de Ixtlán, Oaxaca. Aliados para la Comunidad Forestal A.C. México. 103 p.
- Klooster, D. and O. Masera. 2000. Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change* 10: 259-272.
- Klooster, D. and S. Ambinakudige. 2005. The global significance of Mexican Community Forestry. *In: Bray D.B., Merino P.L., Barry D. (eds.). The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes.* University of Texas, Texas. pp: 305-334.
- Köhl, M., R. Lasco, M. Cifuentes, Ö. Jonsson, K. Korhonen, P. Mundhenk, J.J Navar and G. Stinson. 2015. Changes in forest production, biomass and carbon: results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. *Forest Ecology and Management* 352: 21-34.
- Krcmar, E., I. Vertinskyn and G. C. Van Kooten. 2003. Modeling alternative zoning strategies in forest management. *International Transactions in Operational Research* 10: 483–498.
- Leyva L., J.C. 2010. Evaluación de la regeneración natural en rodales mezclados de pinos en San Pedro El Alto, Zimatlán, Oaxaca. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. México. 93 p.
- Leyva L., J.C., A. Velázquez M. y G. Ángeles P. 2010. Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pinos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y de Ambiente* 16: 227-239.
- Lindenmayer, D., C. Messier, A. Paquette and R. J. Hobbs. 2015. Managing tree plantations as novel socioecological systems: Australian and North American perspectives. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 1427–1433.
- López A., R. 2005. Empowering Community-Based Forestry in Oaxaca: The Union of Forest Communities and Ejidos of Oaxaca, 1985-1996. *In: Bray D.B., Merino P.L., Barry D. (eds). The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes.* University of Texas, Texas. pp: 111–124.

- Luján A., C., J.M. Olivas G., H.G González H., S. Vázquez Á., J.C. Hernández D. y H. Luján A. 2016. Desarrollo forestal comunitario sustentable en la región norte de México y su desafío en el contexto de la globalización. *Madera y Bosques* 1: 37-51.
- Macera, O., M. Bellon y G. Segura. 1997. Forestry options for sequestering carbon in México: comparative economic analysis of three case studies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27: 227-244.
- MacDicken, K.G., P. Sola, J.E. Hall, C. Sabogal, M. Tadoum and C. de Wasseige. 2015. Global progress toward sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* 352: 47-56.
- Maclean, D.A., R.S. Seymour, M.K. Montigny and C. Messier. 2009. Allocation of conservation efforts over the landscape: the TRIAD approach. *In: Villard M.A. (ed.). Setting Conservation Targets for Managed Forest Landscapes. Cambridge University, United Kingdom. pp: 283–303.*
- Mawengkang, Z. y H. Mawengkang. 2015. Modelling zoning strategies in forest sustainable management. *Bulletin of Mathematics* 7: 35-46.
- Mendoza, A. 2015. El bosque cultivado y sus interminables transformaciones producción y productividad. *Innovación Forestal*. 3 p.
- Merino P., L. and G. Segura W. 2005. Forest and conservation policies and their impact on forest communities in Mexico. *In: Bray D.B., Merino P.L., Barry D. (eds). The Community Forests of Mexico, Managing for Sustainable Landscapes. University of Texas, Texas. pp: 49-70.*
- Messier, C., B. Bigué y L. Bernier. 2003. Plantaciones de crecimiento rápido para la protección del ecosistema forestal en Canadá. *Unasylva*. 54: 59–63.
- Messier, C., R. Tittler, D. Kneeshaw, N. Gélinas, A. Paquette, K. Berninger, H. Rheault, P. Meek and N. Beaulieu. 2009. TRIAD zoning in Quebec: experiences and results after 5 years. *The Forestry Chronicle* 85: 885–896.
- Messier, C. y K. J. Puettmann. 2011. Forests as complex adaptive systems: implications for forest management and modelling. *Italian Journal of Forest and Mountain Environments* 66: 249–258.

- Mobtaker, A., M. Ouhimmou and M. Paquet. 2018. Development of an economically sustainable and balanced tactical forest management plan: a case study in Québec. *Canadian Journal of Forest Research* 48: 197-207.
- Montigny, M.K. and D.A MacLean. 2005. Using heterogeneity and representation of ecosite criteria to select forest reserves in an intensively managed industrial forest. *Biological Conservation* 125: 237–248.
- Montigny, M.K. and D.A MacLean. 2006. Triad forest management: scenario analysis of forest zoning effects on timber and non-timber values in New Brunswick, Canada. *The Forestry Chronicle* 82: 496–511.
- Morales H., D., S. N. Oswald and E. Somanathan. 2015. Status and trends in global primary forest, protected areas, and areas designated for conservation of biodiversity from the Global Forest Resources Assessment 2015. *Forest Ecology and Management* 352: 68-77.
- Moreno S., R. and J.M Torres R. 2010. Decision support systems for forest management in Mexico: Their characteristics and context for their creation and evolution. *In: Manos, B., N. Matsatsinis, K. Paparrizos y J. Papathanasiou. (eds.). Decision support systems in agriculture, food and the environment: trends, applications and advances. pp: 74-100.*
- Nasi, R., A. Billand and N. Vancliet. 2012. Managing for timber and biodiversity in the Congo Basin. *Forest Ecology and Management*. 268: 103-111.
- Nitschke, C.R. and J.L Innes. 2004. The application of forest zoning as an alternative to multiple use forestry. *In: Ines J.L. (ed). The Changing Socio-Economic and Political Environment of Forestry. CAB international, Canada. pp: 6-34.*
- Pawson, S.M., A. Brin, E.G. Brockerhoff, D. Lamb, T.W. Payn, A. Paquette and J.A. Parrotta. 2013. Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 22: 1203–1227.
- Pérez H., D. 2016. Prospectiva de la legislación forestal en México. *Foro Agua, Bosques y Biodiversidad. Comisión Nacional Forestal. 37 p.*
- Porter-Bolland, L., E.A. Ellis, M.R. Guariguata, I. Ruiz M., S. Negrete Y. and V. Reyes G. 2011. Community managed forests and forest protected areas: An assessment of their conservation effectiveness across the tropics. *Forest Ecology and Management*

268: 6-17.

- Rosas B., M. y R. Lara R. 2013a. Desarrollo endógeno local sustentable y propiedad común: San Pedro El Alto, México. *Iberoamérica* 10: 59–80.
- Rosas B., M. y R. Lara R. 2013b. Empresas forestales comunitarias y cooperativismo autogestionario: una aproximación teórico-práctica. *Iberoamérica* 15: 237-270.
- Ruiz R., N. y L. Galicia. 2016. La escala geográfica como concepto integrador en la comprensión de problemas socio-ambientales. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* 89: 137-153.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2008. Norma Oficial Mexicana NOM-152- SEMARNAT-2006. Diario Oficial de la Federación (DOF). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 24 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2016. Anuario estadístico de la producción forestal 2015. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 230 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2017. ¿Sustentable o sostenible?. Publicaciones [en línea]. Consultado: 15 de junio de 2018. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/sustentable-o-sostenible?idiom=es>.
- Seymour, R.S. and M.L. Hunter J. 1992. New forestry in eastern spruce–fir forests: Principles and applications to Maine. Maine Agricultural and Forest Experiment Station Miscellaneous Publications. 36 p.
- Seymour, R.S. and M.L. Hunter Jr. 1999. Principles of ecological forestry. *In*: Hunter Jr. M.L. (ed.). *Maintaining biodiversity in Forest ecosystem*. Cambridge University Press, United Kingdom. pp: 22–61.
- Simula, M. 2017. Manejo forestal sustentable: conceptos y retos. Academia Nacional de Ciencias Forestales A.C. México. 20 p.
- Skutsch, M., M. Olguín, P. Gerez, C. Muench, G. Chapela, R. Benet, A. Chávez y R. Galindo. 2018. Increasing Inequalities in Access to Forests and Forest, Benefits in Mexico. *Journal of Latin American Geography* 1: 248-252.
- Tittler, R., E. Filotas, J. Kroese and C. Messier. 2015. Maximizing Conservation and Production with Intensive Forest Management: It's All About Location. *Environmental Management* 56: 1104-1117.

- Tittler, R., C. Messier and R.C. Goodman. 2016. Triad Forest Management: Local Fix or Global Solution. *In*: Larocque G.R. (ed). Ecological Forest Management Handbook. Taylor & Francis, Florida. pp: 33–45.
- Torres R., J.M., 2000. Sostenibilidad del volumen de cosecha calculado con el método mexicano de ordenación de montes. *Madera y Bosques* 6: 57–72.
- Udhe, B., S. Heinrichs, C. Ronja S., C. Ammer, B. Müller-Using y T. Knoke. 2017. Bringing ecosystem services into forest planning- Can we optimize the composition of Chilean forests based on expert knowledge?. *Forest Ecology and Management* 404: 126-140.
- Wallace, J., N. Aquilué, C. Archambault, S. Carpentier, X. Francoeur, M.H. Greffard, I. Laforest, L. Galicia and C. Messier. 2015. Present forest management structures and policies in temperate forests of Mexico: Challenges and prospects for unique tree species assemblages. *The Forestry Chronicle* 91: 1–12.
- Ward, C. and T. Erdle. 2015. Evaluation of forest management strategies based on Triad zoning. *The Forestry Chronicle* 91: 40-51.
- Wijewardana, D. 2008. Criteria and indicators for sustainable forest management: the road travelled and the way ahead. *Ecological Indicators* 8: 115-122.
- Xia, Y., D. Liu, Y. Liu, J. He and X. Hong. 2014. Alternative zoning scenarios for regional sustainable land use controls in China: a knowledge-based multiobjective optimal model. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11: 8839-8866.

CAPÍTULO I. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA ZONIFICACIÓN FUNCIONAL DEL BOSQUE DE SAN PEDRO EL ALTO, ZIMATLÁN, OAXACA.

1.1 Resumen

El enfoque actual de gestión forestal sugiere incluir la producción de servicios ecosistémicos y la conservación de la biodiversidad como objetivos adicionales a la producción maderable. Esto implica definir estrategias de manejo que definan donde y cuando ejecutar las actividades silvícolas con objeto de satisfacer las demandas de productos y maximizar el rendimiento del bosque. Existen diversas herramientas que facilitan la planificación del aprovechamiento de los recursos con uno o más objetivos de producción considerando el potencial productivo del bosque y sus diferentes funciones ecosistémicas, además de la capacidad operativa de los gestores forestales. Los modelos matemáticos son una opción viable, al ser capaces de optimizar la producción de uno o más objetivos de gestión y al mismo tiempo considerar restricciones ecológicas, operacionales y financieras que acotan el problema en la realidad. En este capítulo se presenta un modelo de optimización no lineal entero mixto, conforme al enfoque de zonificación TRIAD para la obtención de productos maderables y no maderables, que maximiza el valor presente (VP) de la producción maderable del recurso forestal de la comunidad de San Pedro El Alto, Zimatlán, Oaxaca; considerando restricciones operativas y de conservación de la biodiversidad. La optimización del VP deberá reflejarse a través de la asignación eficiente del recurso forestal de la comunidad de San Pedro El Alto, conforme al enfoque de zonificación TRIAD para la obtención de productos maderables y no maderables.

Palabras clave: modelo matemático, programación no lineal entera mixta, gestión forestal, valor neto presente, conservación de biodiversidad.

AN OPTIMIZATION MODEL FOR THE FOREST FUNCTIONAL ZONING IN SAN PEDRO EL ALTO, ZIMATLÁN, OAXACA.

1.2 Abstract

The current approach of forest management should include the production of ecosystem services and biodiversity conservation as main objectives additional to the timber production objective. This implies to determine the best management strategy that recommends when and where the harvesting activities must be executed to satisfy the demands of products and maximize the yield of the forest. Several tools have been used to determine the production of one or more objectives considering the forest productivity and different ecosystem functions in addition to the operational and economical capacity of forest managers. Such problems can be mathematically expressed through mathematical models, which can optimize the production of one or more management objectives considering the ecological, operational and financial constraints that limit the problem in reality. This work describes a mixed integer nonlinear optimization model, which allows maximizing the net present value (NPV) depending on a set of operational and biodiversity conservation restrictions. The optimization of the NPV must be reflected through the efficient allocation of San Pedro El Alto forest resources, under the TRIAD zoning approach for obtaining timber and non-timber benefits.

Key words: mathematical model, forest management, net present value, biodiversity conservation.

1.3 Introducción

1.3.1 Modelos de optimización

La importancia y complejidad de la asignación de recursos de manera eficiente para la producción de bienes y servicios, ha dado pauta al desarrollo de herramientas que permitan plantear de manera adecuada los problemas y facilitar la toma de decisiones con miras a cumplir con un conjunto de objetivos de gestión. La programación matemática, denominada también optimización, es una parte de la investigación de operaciones considerada como una herramienta para optimizar uno o más objetivos, en función de las restricciones impuestas a las actividades de gestión o asignación de los recursos (Bettinger *et al.*, 2009; Ohman *et al.*, 2011; Hogansos y Meyer, 2015).

En programación matemática, la abstracción de un problema real se realiza a través de un modelo de optimización. Éste se conforma por una función objetivo, variables de decisión y restricciones anexas al comportamiento de las variables. El objetivo del problema se representa como una función, la cual debe maximizar o minimizar la medida cuantitativa del problema en optimización (Dong *et al.*, 2015), las variables de decisión representan las opciones de toma de decisión para afectar el valor de la función objetivo, y las restricciones son ecuaciones e inecuaciones que representan el conjunto de relaciones que ciertas variables o conjunto de ellas deben satisfacer (Leuschner, 1990; Buongiorno y Gilles, 2003; Ramos *et al.*, 2010).

Un modelo de optimización es una representación matemática simplificada de la realidad, capaz de ofrecer resultados comprensibles y útiles (Buongiorno y Gilles, 2003). Su desarrollo implica un proceso que combina la ciencia y el arte. La parte científica implica la detección de relaciones entre los datos del problema, el establecimiento de supuestos, la representación aproximada del problema y el uso de algoritmos para su solución; mientras que la parte artística involucra la interpretación de la realidad por el modelador, la especificidad del modelo y la documentación del problema en cuestión (Ramos *et al.*, 2010). El proceso para elaborar un modelo matemático comprende de cinco etapas generales (Figura 1.1) que permiten entender de mejor manera el fenómeno de interés y posiblemente predecir su comportamiento en el futuro (Tsang, 1991; Ramos *et al.*, 2010).

La primera etapa corresponde a la identificación del problema (cuantificable) y a la recolección de datos relevantes; la segunda etapa concierne a la formulación matemática del problema, lo cual implica definir las variables de decisión, la función objetivo y el conjunto de restricciones (ecuaciones) que definirán el tipo de modelo (lineal, no lineal, entero o mixto). En la tercera etapa se procede a la resolución del modelo mediante la aplicación de algún algoritmo ya sea de propósito general (método simplex) o específico. En dicha etapa el producto deseable es la solución numérica ya sea óptima o cuasi óptima.

Posterior a la resolución, en la etapa cuatro hay que verificar y refinar el modelo propuesto, ya sea a través de la eliminación de errores en la codificación, pues se debe conseguir que el modelo haga lo que se ha especificado matemáticamente; o mejorando la capacidad de representación del sistema. Esta etapa es crucial para la validación del modelo, pues si al comparar las predicciones con datos reales, los datos obtenidos son diferentes, el proceso debe reiniciarse en la etapa dos. En la penúltima etapa, se debe realizar la interpretación resultados y el análisis de sensibilidad, lo cual permitirá conocer el comportamiento del modelo y comprobar la robustez de la solución. Por último, la etapa final corresponde a la implementación del modelo, la capacitación de futuros usuarios y del personal que estará a cargo del monitoreo del modelo implementado.

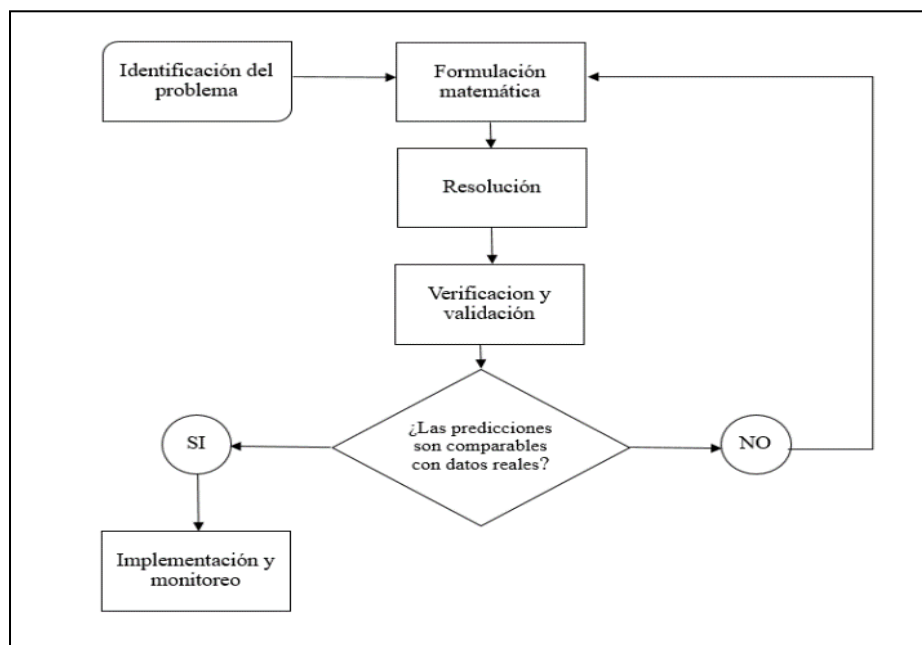


Figura 1.1 Proceso para la elaboración del modelo matemático.

1.3.1.1 Modelos de optimización con enfoque forestal

El manejo de los recursos naturales en general, involucra procesos para la toma de decisiones en cuanto a las estrategias de aprovechamiento y conservación de los mismos (Moreno y Torres, 2010). En particular, la gestión de bosques implica una planificación jerárquica en diferentes niveles. El nivel más alto corresponde a la planificación estratégica, en la cual los objetivos se fijan a largo plazo (normalmente de 40 a 100 años), el siguiente nivel corresponde a la planificación táctica, en donde se especifican las áreas de aprovechamiento a mediano plazo (10 a 20 años), y en el último nivel se encuentra la planificación operativa, la cual define el plan de acción a corto plazo para cumplir con las actividades definidas (Karlsson *et al.*, 2004; Broz *et al.*, 2015).

Comúnmente, los administradores forestales deben decidir qué, cuánto, cuándo y dónde cosechar para satisfacer la demanda de madera en la industria forestal (Carlsson, 1999). En el pasado las estrategias de aprovechamiento de los bosques estaban enfocadas únicamente a maximizar las ganancias obtenidas por la cosecha de madera en un horizonte de planeación (Baskent y Keles, 2005; Bouchard *et al.*, 2017). El objetivo actual de la gestión forestal incluye la producción de servicios ecosistémicos y la conservación de la biodiversidad, lo que implica el reto de determinar la cantidad adecuada a cosechar o conservar de cada producto mientras se maximiza la utilidad del bosque (Anderson *et al.*, 2006; Marusak *et al.*, 2015).

La definición de actividades productivas a realizar en el sector forestal es una tarea compleja pero clave del manejo forestal, sobre todo en el aspecto operacional; ya que la asignación de actividades de una manera ineficiente afecta el rendimiento económico y también los procesos ecológicos y sociales (De Sousa *et al.*, 2015; Augustynczyk *et al.*, 2016). Para evitar los conflictos en la toma de decisiones para el cumplimiento de diversos objetivos en el sector forestal se han utilizado modelos de optimización que respaldan la toma de decisiones tales como (Baskent y Keles, 2005): los regímenes silvícolas aplicables en un bosque, volumen de cosecha en un tiempo determinado, cuál es la edad óptima de rotación, áreas potenciales de producción, etc. (Badilla *et al.*, 2014; Hogansos y Meyer, 2015; Troncoso *et al.*, 2015).

Los modelos de optimización son herramientas que optimizan uno o más objetivos de gestión, al tiempo que cumplen una variedad de restricciones financieras y ecológicas (Ohman *et al.*, 2011; Hogansos y Meyer, 2015).

En el manejo forestal se han direccionado esfuerzos para desarrollar modelos de optimización en la gestión de bosques y la industria forestal, por ejemplo, se ha buscado maximizar las ganancias producto del aprovechamiento forestal (Beaudoin *et al.*, 2007; Korosuo *et al.*, 2014; Carvajal *et al.*, 2015 y Troncoso *et al.*, 2015), maximizar la producción mediante la asignación de áreas potencialmente productivas y de valor ecológico (Krcmar *et al.*, 2003; Hogansos y Meyer, 2015; Augustynczyk *et al.*, 2016 y Martin *et al.*, 2017), maximizar eficiencia en la integración de cadenas de valor en la industria forestal y suministro de productos (Kong *et al.*, 2012; Seidl *et al.*, 2013; Boukherroub *et al.*, 2017), minimizar costos de producción y transporte (López *et al.*, 2008; Rix *et al.*, 2014; Bont *et al.*, 2015; Vergara *et al.*, 2015) y minimizar la fragmentación del paisaje a causa de las actividades de aprovechamiento (Korosuo *et al.*, 2014; Carvajal *et al.*, 2015 y Ross y Tóth, 2016).

A nivel nacional e internacional, los gestores forestales y los encargados de formular políticas públicas buscan estrategias para equilibrar las demandas de la industria forestal con otros valores ecológicos como la conservación de la biodiversidad. Un problema común que enfrentan es determinar la asignación de áreas de conservación y los tratamientos silvícolas y de otro tipo de manejo que maximicen el VP y cumplan con requisitos ecológicos específicos (Krcmar *et al.*, 2003; Tittler *et al.*, 2015; Vergara *et al.*, 2015).

Una forma de lograr este equilibrio puede ser a través de la zonificación forestal funcional, un sistema de planificación que implica la segregación de áreas específicas del bosque para fines específicos (Tittler *et al.*, 2015; Mazza *et al.*, 2016). La especialización en el uso de la tierra indicada por la zonificación podría reducir la asignación ineficiente de recursos en comparación a cuando se exige producir beneficios maderables o no maderables en una sola área, lo cual resulta ineficiente para la generación de productos (Côté *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 2012). Pero partir de una zonificación como estrategia de planificación generalmente requiere lidiar con la determinación del tamaño de cada zona y su ubicación con base en la

capacidad de cada una para lograr múltiples objetivos (Krcmar *et al.*, 2003; Nitschke e Innes, 2004; Yousefpour y Hanewinkel, 2009), además que existe una variedad de reglas que pueden aplicarse en la zonificación bajo diversos enfoques de gestión forestal (Tittler *et al.*, 2015).

Las circunstancias antes descritas presentan una oportunidad para proponer un enfoque de zonificación funcional que propicie el mantenimiento a futuro de la variedad de bienes y servicios que los recursos forestales proporcionan (Bray *et al.*, 2006; Galicia *et al.*, 2013; Galicia *et al.* 2015). Este trabajo propone un modelo de optimización no lineal entero mixto, que maximiza el VP, producto de la cosecha de madera considerando restricciones operativas y de conservación bajo un enfoque de zonificación TRIAD. El modelo asigna una sección del bosque a aprovechamiento intensivo para la producción de madera, otra sección a aprovechamiento extensivo para la obtención de productos no maderables y cosecha de madera, pero en una escala menor; y la sección restante a conservación y recuperación para proteger la biodiversidad y la funcionalidad del ecosistema.

1.4 Materiales y métodos

1.4.1 Datos del modelo

El modelo propuesto para maximizar la ganancia económica derivada del aprovechamiento forestal se desarrolló para el área bajo manejo forestal maderable de la comunidad forestal San Pedro El Alto, Zimatlán, Oaxaca. A través de su Plan de Manejo Forestal (PMF) 2016-2017/ 2025-2026 la comunidad proporcionó información a nivel rodal correspondiente a: volumen maderable disponible por hectárea (m^3/ha), calidad del sitio, incremento medio anual del volumen maderable (m^3/ha), tipo de hábitat y tratamiento silvícola programado.

Adicionalmente se determinó el potencial de aprovechamiento para cada rodal con base en los datos proporcionados de IS. Las alturas dominantes registradas varían de 16 a 43 metros, lo que indica que existe un alto nivel productivo en el predio. Por lo anterior, únicamente se consideró a la pendiente como factor de clasificación para el potencial de aprovechamiento. De acuerdo con la propuesta de zonificación, se asignaron dos categorías para el potencial de aprovechamiento. La primera categoría corresponde al potencial de aprovechamiento

intensivo, en donde fueron asignados todos los rodales con pendientes menores al 70% y en la segunda categoría de potencial de aprovechamiento extensivo, todos los rodales con pendientes iguales o mayores al 70%. El criterio definido anteriormente pretende reducir los costos de transporte y accesibilidad al área durante el proceso de cosecha, así como la erosión del suelo en pendientes pronunciadas.

Los tratamientos silvícolas definidos para la zona de aprovechamiento intensivo fueron propuestos en el PFM (aclareo ligero, aclareo normal, corta de regeneración y corta de liberación). Para la zona de aprovechamiento extensivo se consideraron tres cosechas comerciales distribuidas equitativamente en el horizonte de planeación. En cuanto a la zona de conservación y recuperación del ecosistema, la prioridad de conservación para cada tipo de hábitat se asignó de manera equitativa (la superficie total entre el número de hábitats presentes), requiriendo así una máxima superficie por tipo de hábitat. Lo anterior permite que se incluyan en su totalidad aquellos hábitats que presenten una superficie menor al máximo establecido.

Debido a que el horizonte de planeación en el PFM es de 10 años, para fines de modelado la proyección del incremento medio anual (IMA) se determinó con la siguiente función:

$$IMA_{j+i} = IMA_j \cdot e^{-0.02271 \cdot (E_2 - E_1)}$$

donde

IMA_1 : incremento medio anual del rodal en el periodo j

IMA_2 : incremento medio anual del rodal en el periodo $j + 1$

E_1 : edad del rodal en el periodo j

E_2 : edad del rodal en el periodo $j + 1$

Por último, para el cálculo del VP se consideró el precio comercial por tipo de producto a obtener de acuerdo con la distribución de productos del volumen total cosechado en cada tipo de tratamiento silvícola.

1.4.2 Formulación del modelo

1.4.2.1 Supuestos de modelado

El problema en análisis involucra relaciones no lineales y variables de decisión enteras y continuas, por tanto, el modelo propuesto se describe como un modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM). Los supuestos del modelo respecto a las condiciones del bosque bajo manejo y a las posibilidades operativas de la comunidad para las actividades de aprovechamiento son:

- La superficie destinada para uso forestal no cambia durante el periodo de planificación.
- La unidad mínima de manejo considerada dentro del bosque es el rodal.
- Los tratamientos silvícolas de prescripción consideran las características de edad, densidad, tolerancia e intolerancia de las especies arbóreas presentes en cada rodal.
- La zonificación TRIAD considerada divide el territorio forestal bajo manejo en tres tipos de zonas, cada una designada de acuerdo con la intensidad de aprovechamiento en función de las prioridades y objetivos específicos establecidos para cada zona.
- La tasa de crecimiento del volumen de madera en el bosque corresponderá al incremento medio anual de los árboles en pie.
- Todos los rodales son accesibles durante el periodo de planificación para realizar las actividades silvícolas prescritas.
- La comunidad presenta riesgos de invasión en las colindancias del área bajo manejo por parte de comunidades vecinas.
- El volumen maderable extraído del bosque comunal es el único insumo para el funcionamiento del aserradero de la comunidad.
- La ganancia económica estará valorada en términos del valor presente (VP)
- La tasa de interés real (4%) utilizada para calcular el VP será constante en el horizonte de planeación

1.5 Resultados y discusión

1.5.1 Modelo matemático

1.5.1.1 Índices

i : contabiliza los i -ésimos rodales $i = 1, \dots, N$

j : contabiliza los j -ésimos periodos (años) de planeación de la cosecha $j = 1, \dots, J$

t : contabiliza los t -ésimos tratamientos silvícolas posibles de prescripción $t = 1, \dots, T$

k : contabiliza los k -ésimas categorías de zonificación de la masa forestal $k = 1, \dots, K$

a : contabiliza los a -ésimos tipos de hábitat presentes en el bosque $a = 1, \dots, A$

q : contabiliza los q -ésimos productos maderables posibles de obtener $q = 1, \dots, Q$

1.5.1.2 Parámetros

DP_{qt} : Porcentaje del volumen maderable cosechado (m^3) destinado a la obtención del producto q en función del tratamiento silvícola t .

S_{cd} : Superficie de conservación y restauración (ha) deseable en el área forestal.

S_a : Superficie ocupada por el tipo de hábitat a (ha) en el área forestal.

S_i : Superficie correspondiente al rodal i en hectáreas.

LS_a : Superficie máxima a destinar para conservación del hábitat a (ha).

Llr_j : Capacidad mínima de procesamiento del aserradero comunal (m^3) para un periodo j .

I_{ij} : Incremento en volumen maderable (m^3) para el rodal i en el periodo j .

IMA_{ij} : Incremento medio anual del volumen maderable (m^3/ha) del rodal i en el periodo j .

e_{ij} : Edad del rodal i (años) en el periodo j .

Hl : Superficie forestal bajo condiciones de litigio (ha).

Ae : Superficie total correspondiente a la propiedad de la comunidad forestal (ha).

VE_{ij} : Volumen maderable (m^3) existente en el rodal i en el periodo j .

M_{ij} : Volumen maderable (m^3) mínimo a extraer en el periodo j .

M_{hj} : Volumen maderable (m^3) máximo a extraer en el periodo j .

G_{lt} : Intensidad de corta mínima (%) especificada por el tratamiento silvícola t .

G_{ht} : Intensidad de corta máxima (%) especificada por el tratamiento silvícola t .

Pc : Beneficio económico por hectárea mantenida en la zona de conservación.

Pp : Beneficio económico por m^3 para productos primarios.

Ps : Beneficio económico por m^3 para productos secundarios.

Po : Beneficio económico por m^3 para productos celulósicos y otros.

P_e : Pérdida económica por unidad contabilizada en la variable de interés.

g_a : Diferencia entre la superficie ocupada por el tipo de hábitat (S_a) y la superficie máxima del mismo hábitat a destinar para conservación (LS_a).

e_{ij+1} : Edad del rodal i (años) en el periodo j más un año

VE_{ij+1} : Volumen maderable (m^3) existente (VE_{ij}) más el incremento medio anual (I_{ij}) menos el volumen cosechado en el rodal i en el periodo j (X_{itj})

I_{ij} : Incremento medio anual (IMA_{ij}) multiplicado por la superficie del rodal i en el periodo j .

$h_{ia} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat } a \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$w_{itj} \begin{cases} 1 & \text{si al rodal } i \text{ se le aplica el tratamiento silvícola } t \text{ en el periodo } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$SE_a \begin{cases} 0 & \text{si } g_a \leq 0 \\ S_a - LS_a & \text{si } g_a > 0 \end{cases}$

1.5.1.3 Variables de decisión

A continuación, se enlistan las variables de decisión tanto continuas como enteras binarias que inciden en la función objetivo del PNLEM para maximizar el VP:

$y_{ik} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es asignado a la categoría de zonificación } k \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$U_{i',j} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ y el rodal } i' \text{ son aprovechados en el periodo } j \text{ y son colindantes} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$PT_i \begin{cases} 1 & \text{si la zonificación del rodal } i \text{ corresponde al potencial del rodal } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$F_j \begin{cases} 1 & \text{si en el periodo } j \text{ el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

α : Superficie total asignada a la zona de conservación y restauración (ha).

α_a : Superficie total determinada para conservación (ha) para el tipo de hábitat a .

Sc_a : Superficie seleccionada para conservación (ha) del total de la superficie ocupada por el tipo de hábitat a .

DDC : Déficit de superficie por asignar a para conservación (ha).

ST_a : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat a para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_a .

β_j : Volumen maderable a extraer (m³) en el periodo j .

β_{jt} : Volumen maderable a extraer (m³) en el periodo j en función del tratamiento silvícola t .

O_{qj} : Volumen maderable a extraer (m³) correspondiente a la obtención del producto q en el periodo j .

X_{ijt} : Volumen maderable a extraer (m³) del rodal i en función del tratamiento silvícola t en el periodo j .

V_{iktj} : Volumen maderable a extraer (m³) del rodal i perteneciente a la zona k en función del tratamiento silvícola t para el periodo j

1.5.1.4 Función objetivo y restricciones

A continuación, se presenta la función objetivo del PNLEM y las restricciones que lo acotan:

$$\max z: C_1 + C_2 + C_3 - C_4 - C_5 \quad (1.1)$$

donde

$$C_1 = \sum_{j=1}^J \left(\frac{Pc}{(1.04)^j} \right) \cdot \alpha \quad (1.2)$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^J \left(\frac{Pp}{(1.04)^j} \right) \cdot O_{1j} + \sum_{j=1}^J \left(\frac{Ps}{(1.04)^j} \right) \cdot O_{2j} + \sum_{j=1}^J \left(\frac{Po}{(1.04)^j} \right) \cdot O_{3j} \quad (1.3)$$

$$C_3 = - \left(\frac{Hl}{Ae} \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N U_{ii',j} \cdot \left(\frac{Pc}{(1.04)^j} \right) \right) \quad (1.4)$$

$$C_4 = \sum_{i=1}^N PT_i \cdot \left(\frac{Pe}{(1.04)^j} \right) \quad (1.5)$$

$$C_5 = \sum_{j=1}^J F_j \cdot \left(\frac{Pe}{(1.04)^j} \right) \quad (1.6)$$

sujeto a

$$\alpha = \sum_{a=1}^A \alpha_a \quad (2.1)$$

$$\alpha_a = Sc_a + ST_a \quad (2.2)$$

$$\sum_{a=1}^A ST_a = DDC \quad (2.3)$$

$$DDC = Scd - \sum_{a=1}^A Sc_a \quad (2.4)$$

$$ST_a \leq SE_a \quad (2.5)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1 \quad (2.6)$$

$$\beta_j = \sum_{j=1}^J \beta_{jt} \quad (2.7)$$

$$\beta_{jt} = \sum_{i=1}^N X_{itj} \quad (2.8)$$

$$X_{itj} = V_{iktj} \cdot Y_{ik} \cdot W_{itj} \quad (2.9)$$

$$O_{qj} = \sum_{t=1}^T DP_{qj} \cdot \beta_{jt} \quad (2.10)$$

$$M_{lj} \leq \beta_j \leq M_{hj} \quad (2.11)$$

$$G_{lj} \cdot VE_{ij} \leq V_{iktj} \leq G_{hj} \cdot VE_{ij} \quad (2.12)$$

$$Llr_j \leq \sum_{q=1}^2 O_{qj} \quad (2.13)$$

$$\sum_{t=1}^T W_{itj} \cdot Y_{ik} = 1 \quad \forall \quad k \geq 2 \quad (2.14)$$

$$V_{iktj} \geq 0 \quad (2.15)$$

La función objetivo (ecuación 1.1) está diseñada para maximizar la ganancia monetaria neta presente generada por el volumen maderable (m^3) a cosechar y por el beneficio económico que implica la conservación del hábitat presente en el bosque. El término C_1 dentro de la función objetivo, refiere al beneficio económico que implica mantener determinada superficie bajo conservación y recuperación (ecuación 1.2), mientras que el término C_2 , refiere a la ganancia obtenida por tipo de producto posible a obtener durante el horizonte de planeación siendo los tipos de productos considerados: primarios (O_{1j}), secundarios (O_{2j}) y celulósicos y otros (O_{3j}).

El término C_3 implica la pérdida monetaria (Pc) por no realizar la cosecha de forma dispersa en todo el bosque de producción, es decir; aumentando el riesgo de invasión al no tener presencia de actividades en ciertas zonas del bosque y sobre todo en las limítrofes compartidas con otras comunidades. Por su parte, el término C_4 representa una pérdida económica (Pe) si el rodal i es asignados en alguna zona de aprovechamiento sin considerar el potencial de uso del mismo. Similarmente, el término C_5 sanciona económicamente (Pe) si en algún periodo el volumen de extracción supera los 150 000 m³. Los términos C_4 y C_5 de la función objetivo, corresponden a restricciones suaves del modelo, lo que flexibiliza al permitir una solución que viole ambas o alguna de las restricciones, sin embargo, se penaliza por ello y la sanción se verá reflejada en la función objetivo.

El modelo matemático está acotado por 15 restricciones. La ecuación (2.1) establece que la superficie de conservación y recuperación deberá ser igual a la suma de las superficies destinadas al mismo propósito de cada hábitat presente en el área (Sc_a). En caso de que la superficie asignada para conservación y recuperación no iguale a la superficie deseable en el mismo propósito (Sdc), la diferencia generará un déficit (DDC) (ecuación 2.4) el cual deberá completarse nuevamente a través de la selección de superficie por cada tipo de hábitat (ecuación 2.3) siempre y cuando la superficie del hábitat sea mayor que la primera asignación de superficie (Sc_a) (ecuación 2.5). Por lo tanto, la superficie total de conservación y recuperación del hábitat será la suma de la superficie asignada a conservación en la primera etapa Sc_a más la superficie asignada en la segunda etapa ST_a (ecuación 2.2).

La ecuación (2.6) indica que el rodal i solo puede ser asignado a una categoría de zonificación y ésta no cambiará dentro del horizonte de planeación. La ecuación (2.7) indica que el volumen maderable a extraer por periodo dependerá del volumen extraído en función del tratamiento silvícola aplicado y a su vez el volumen extraído por tipo de tratamiento será la suma del volumen de todos aquellos rodales sometidos a cada tipo de tratamiento (ecuación 2.8). La ecuación (2.9) determina que el volumen maderable extraído por rodal será únicamente contable si se respeta la zona a la cual ha sido asignado y por ende el tratamiento silvícola correspondiente.

El volumen maderable necesario para obtener cada tipo de producto en un periodo j , será igual a la suma de los volúmenes extraídos por tipo de tratamiento silvícola multiplicados por el porcentaje correspondiente del producto respecto a un m^3 de madera (ecuación 2.10). Para restringir la cantidad máxima y mínima deseable de volumen maderable por periodo j dentro del horizonte de planeación se define la ecuación (2.11). La ecuación (2.12) indica los límites mínimos y máximos permitidos en la intensidad de corta para el volumen maderable existente (VE_{ij}) en el rodal i y un periodo j (G_{lj} y G_{hj} respectivamente), siendo estos determinados por el tratamiento silvícola a prescribir en el rodal.

También se considera la capacidad mínima de procesamiento en volumen (por periodo) del aserradero de la comunidad forestal (ecuación 2.13) y para impedir que se prescriban dos tratamientos en el mismo rodal i para un periodo j y que la intervención para el rodal i se llevará a cabo solo una vez dentro del horizonte de planeación, se formuló la ecuación (2.14). Por último, la restricción de no negatividad del modelo corresponde a la ecuación (2.15).

1.6 Conclusiones

La perspectiva del manejo forestal requiere desarrollar modelos de optimización que permitan gestionar el bosque de tal manera que, se maximicen las ganancias producto del aprovechamiento forestal mediante la asignación diferenciada de áreas forestales con alto valor productivo y ecológico. El modelo propuesto no lineal entero mixto (PNLEM) permite abstraer el problema de zonificación TRIAD, considerando restricciones operativas y de resguardo de la biodiversidad. El modelo retoma los diferentes objetivos productivos establecidos por la comunidad de San Pedro El Alto y tiene la facultad de valorar cuantitativamente bienes maderables provenientes del volumen a cosechar y bienes no maderables derivados de la no intervención silvícola en secciones de bosque. Además de especificar como cuando y donde realizar las actividades operativas de aprovechamiento, la estructura del PNLEM tiene la capacidad de maximizar las ganancias económicas en términos de valor presente (VP) bajo el esquema de manejo forestal propuesto

1.7 Literatura citada

- Anderson, M., O. Sallnäs and M. Carlsson. 2006. A landscape perspective on differentiated management for timber and nature conservation values. *Forest Policy and Economics* 9: 153-161.
- Anderson, J.A., G.W. Armstrong, M.K. Luckert and W.L. Adamowicz. 2012. Optimal zoning of forested land considering the contribution of exotic plantations. *Forestry and Natural Resource Sciences* 4: 92-104.
- Augustynczyk, A.L.D., J.E. Arce and A.C.L. Silva. 2016. Aggregation forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming. *Journal of Forest Economics* 24: 72-81.
- Badilla V., F., J.P. Watson, A. Weintraub, R.J.B. Wets and D.L. Woodruff. 2014. Stochastic optimization models in forest planning: a progressive hedging solution approach. *Annals of Operations Research* 232: 259-274.
- Baskent, E.Z. y S. Keles. 2005. Spatial forest planning: A review. *Ecological Modelling* 188: 145-173.
- Beaudoin, D., L. Lebel and J. Frayret. 2007. Tactical supply chain planning in the forest products industry through optimization and scenario-based analysis. *Canadian Journal of Forest Research* 37: 128-140.
- Bettinger, P., J. Sessions and K. Boston. 2009. A review of the status and use of validation procedures for heuristics used in forest planning. *International Journal of Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resources Sciences* 1: 26-37.
- Bont, L.G., H.R. Heinimann and R.L. Church. 2012. Concurrent optimization of harvesting and road network layouts under steep terrain. *Annals of Operational Research* 232: 41-64.
- Bray, D.B., C. Antinori and J.M. Torres R. 2006. The Mexican model of community forest management: The role of agrarian policy, forest policy and entrepreneurial organization. *Forest Policy and Economics* 8: 470-484.
- Broz, D., G. Duran, D. Rossit, M. Frutos and D. Rossit. 2015. Un modelo de optimización para la planificación anual de la cosecha forestal en el noreste argentino. *In: XXVIII Encuentro Nacional de Docentes en Investigación Operativa. XXVI Escuela de Perfeccionamiento en Investigación y Red Iberoamericana de Evaluación y Decisión*

- Multicriterio VIII. 20-22 mayo 2015. Bahía Blanca, Argentina. pp: 1–16.
- Buongiorno, J. y J.K. Gilles. 2003. Decision methods for forest resource management. Academic Press, Wisconsin. pp: 9-27.
- Bouchard, M., S. D'Amours, M. Rönnqvist, R. Azouzi and E. Gunn. 2017. Integrated optimization of strategic and tactical planning decision in forestry. *European Journal of Operational Research* 259: 1132-1143.
- Boukherroub, T., L. LeBel and A. Ruiz. 2017. A framework for sustainable forest resource allocation: a Canadian case study. *Omega* 66: 224-235.
- Carlsson, M. 1999. A method for integrated planning of timber production and biodiversity: a case study. *Canadian Journal of Forest Research* 29: 1183-1191.
- Carvajal, R., M. Constantino, M. Goycoolea, J.P. Vielma and A. Weintraub. 2015. Imposing connectivity constraints in forest planning models. *Operations Research* 61: 824-836.
- Côté, P., R. Tittler, C. Messier, D.D. Kneeshaw, A. Fall and M.J. Fortin. 2010. Comparing different forest zoning options for landscape-scale management of the boreal forest: possible benefits of the TRIAD. *Forest Ecology and Management* 259: 418-427.
- de Sousa X., A.M., M.B. Costa F. and R.M. de Sousa F. 2015. Management of Mediterranean forests – a compromise programming approach considering different stakeholders and different objectives. *Forest Policy and Economics* 57: 38-46.
- Dong, L., P. Bettinger, Z. Liu and H. Qin. 2015. Spatial forest harvest scheduling for areas involving carbon and timber management goals. *Forests* 6: 1362-1379.
- Galicia, L., L. Gómez M. and V. Magaña. 2013. Climate change impacts and adaptation strategies in temperate forests in Central Mexico: a participatory approach. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 22 p.
- Galicia, L., C. Potvin and C. Messier. 2015. Maintaining the high diversity of pine and oak species in Mexican temperate forests: a new management approach combining functional zoning and ecosystem adaptability. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 1358–1368.
- Hoganson, H.M. and N.G. Meyer. 2015. Constrained optimization for addressing forest-wide timber production. *Canadian Journal of Forest Research* 1:33-43.
- Karlsson, J., M. Rönnqvist and J. Bergström. 2004. An optimization model for annual harvest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1747-1754.

- Kong, J., M. Rönnqvist y M. Frisk. 2012. Modeling an integrated market for sawlogs, pulpwood, and forest bioenergy. *Canadian Journal of Forest Research* 42: 315–332.
- Korosuo, A., T. Heinonen, K. Öhman, H. Holmström y L.O. Eriksson. 2014. Spatial optimization on forest planning using different fragmentation measures. *Forest Science* 60: 764-775.
- Krcmar, E., I. Vertinskyn y G. C. Van Kooten. 2003. Modeling alternative zoning strategies in forest management. *International Transactions in Operational Research* 10: 483–498.
- Leuschner, W. A. 1990. Area control mathematical programming. *In: Leuschner, W. A. (ed). Forest regulation harvest scheduling and planning. John Wiley & Sons, Virginia. pp: 27-38.*
- López, R., O. Carrero, M. Jerez, M. Quintero y J. Stock. 2008. Modelo preliminar para la planificación del aprovechamiento en plantaciones forestales industriales en Venezuela. *Interciencia* 33: 802-809.
- Martin, A.B., J.L.W. Ruppert, E.A. Gunn y D.L. Martell. 2017. A replanning approach for maximizing woodland caribou habitat alongside timber production. *Canadian Journal of Forest Research* 47: 901-901.
- Marušák, R., J. Kašpar, R. Hlavatý, R. Kotek, K. Kuželka y P. Vopěnka. 2015. Alternative modelling approach to spatial harvest scheduling with respect to fragmentation of forest ecosystem. *Environmental Management* 56: 1134-1147.
- Maza, C.A.S., M.C. Medeiros M., D. Almeida, J.E. dos Santos, A. Terumi F. 2016. Land use and environmental zoning of mixed ombrophilous forests for sustainable use (Irati National Forest, Brazil southern region). *Brazilian Archives of Biology and Technology* 59: 1-11.
- Moreno S., R. y J.M Torres R. 2010. Decision support systems for forest management in Mexico: Their characteristics and context for their creation and evolution. *In: Manos, B., N. Matsatsinis, K. Paparrizos y J. Papathanasiou (eds). Decision support systems in agriculture, food and the environment: trends, applications and advances. IGI Global, Pennsylvania. pp: 74-100.*

- Nitschke, C.R. y J.L. Innes. 2004. The application of forest zoning as an alternative to multiple use forestry. *In*: Innes, J.L., G.M. Hickey y H.F. Hoen (eds). Forestry and environmental change: Socioeconomic and political dimensions: Report No. 5 of the IUFRO task force on environmental change. CABI, Reino Unido. pp: 97-124.
- Öhman, K., L. Edenius y G. Mikusiński. 2011. Optimizing spatial habitat suitability and timber revenue in long-term forest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 543-551.
- Ramos, A., P. Sánchez, J.M. Ferrer y P. Linares. 2010. Modelos matemáticos de optimización. Universidad de Comillas. [en línea]. Consultado: 18 de Junio de 2018. Disponible en: <http://biblioteca.iplacex.cl/RCA/Modelos%20matem%C3%A1ticos%20de%20optimizaci%C3%B3n.pdf>
- Rix, G., L. Rousseau y G. Pesant. 2014. A transportation-driven approach to annual harvest planning. *In*: Optimization Day 2014. 5-7 de Mayo. Montreal, Canada. pp: 1-29.
- Ross, K.L y S.F. Tóth. 2016. A model for managing edge effects in harvest scheduling using spatial optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research* 31: 646-654.
- Seidl, R., C.S. Eastaugh, K. Kramer, M. Maroschek, C. Reyer, J. Socha y G. Vacchiano. 2013. Scaling issues in forest ecosystem management and how to address them with models. *European Journal of Forest Research* 132: 653-666.
- Titler, R., E. Filotas, J. Kroese y C. Messier. 2015. Maximizing conservation and production with intensive forest management: it's all about location. *Environmental Management* 56: 1104-1117.
- Troncoso, J., S. D' Amours, P. Flisberg, M. Rnqvist y A. Weintraub. 2015. A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain- a case study in the Chilean forest industry. *Canadian Journal of Forest Research* 45: 937-949.
- Tsang, C.F., 1991. The modelling process and model validation. *Ground Water* 29: 825-831.
- Vergara, F.P., C.D. Palma y H. Sepúlveda. 2015. A comparison of optimization models for lumber production planning. *Bosque* 36: 239-246.

CAPÍTULO II. TÉCNICAS HEURÍSTICAS PARA MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

2.1 Resumen

El proceso de optimización comúnmente se implementa para resolver un problema, planteado a través de una función objetivo, que busca maximizar o minimizar su valor mediante la asignación de valores a las variables de decisión que satisfacen los objetivos planteados y cumplen con las restricciones del problema. Los métodos de resolución para problemas de optimización son de dos tipos, exactos y de aproximación. Los métodos exactos corresponden a la programación lineal, programación entera, programación mixta y programación binaria, mientras que en los métodos aproximados destacan las técnicas heurísticas, las cuales ofrecen procedimientos simples para obtener soluciones aceptables al problema de forma rápida.

En el área forestal, desde 1960, se han definido diversos problemas y procesos que requieren ser optimizados para asignar eficientemente recursos bajo diferentes objetivos de producción. En los últimos 20 años se han empleado diferentes heurísticas como la técnica de Monte Carlo, el recocido simulado, la búsqueda tabú y diversos algoritmos genéticos, para resolver problemas complejos de planificación forestal. El objetivo común de estas técnicas es maximizar el beneficio económico que se obtiene a través del aprovechamiento de los recursos forestales.

En este capítulo se presenta el modelo propuesto y su adaptación a la instancia (escenario real y cuantificable) definida para resolver el problema de optimización planteado en el Capítulo 2. Inicialmente se describen los métodos heurísticos y metaheurísticos utilizados para la resolución del modelo: búsqueda local simple, búsqueda local múltiple, multiarranque, recocido simulado y algoritmos genéticos. Posteriormente se presenta la codificación desarrollada para las técnicas heurísticas y, finalmente el procesamiento de la información y la representación de las soluciones obtenidas.

Palabras clave: heurísticas, metaheurísticas, optimización forestal, maximización de ganancias.

HEURISTIC TECHNIQUES FOR OPTIMIZATION MODELS

2.2 Abstract

The optimization process is commonly used to solve a specific problem that looks for maximizing or minimizing the value of a defined objective function, through the assignment of values to the decision variables and satisficing the proposed objectives, considering the restrictions of the problem. The known resolution methods to solve an optimization problem are of two types, exact and approximated. The common exact methods correspond to linear programming, goal programming, mixed programming and binary programming; while the approximated methods include heuristic techniques which offer simple procedures to obtain a good solution in a quick and easy way.

The main advantage presented by the heuristic in comparison with the exact methods is that they are able to solve in a reasonable time, problems of high complexity, which are a non-linear type or have restrictions that cannot be addressed by the exact methods. Since 1960, to determine the efficient allocation of resources under different production objectives, several optimization problems have been defined in forest management, and in the last 20 years, different heuristics have been used, such as the Monte Carlo technique, simulated annealing, taboo search and genetic algorithms.

The common objective of optimization problems in forestry is to maximize the economic benefit obtained through the use of forest resources, and for the study case, this chapter presents the model instance (real scenario) defined to solve the optimization problem proposed in Chapter 2. Likewise, the heuristic and metaheuristic methods used to solve the model are described: simple local search, multiple local search, multi-start, simulated annealing, and genetic algorithms; besides the coding used by heuristic techniques for processing information and obtaining solutions.

Key words: heuristics, metaheuristics, forest optimization, profit maximization.

2.3 Introducción

En el ámbito científico la optimización se define como el proceso de obtener el valor de una o más variables de decisión con los cuales una determinada función objetivo alcanza su máximo o mínimo valor, siendo este considerado como la solución al problema definido, el cual comúnmente es acotado por diversas restricciones (Martí, 2003; Kaya *et al.*, 2016).

Comúnmente se puede resolver un problema de optimización de dos maneras, utilizando métodos exactos o métodos heurísticos (Sörensen, 2015). La programación lineal, la programación entera y la programación mixta comprenden métodos exactos capaces de obtener una solución óptima del problema. Entre los más conocidos están el método simplex y el algoritmo de ramificación y acotamiento (Buongiorno y Gilles, 2003; Quintero, 2009; Bettinger *et al.*, 2017).

En cuanto a los métodos heurísticos, estos pueden referirse ya sea a heurísticas o metaheurísticas. Las heurísticas se definen como un procedimiento simple de aproximación que resuelve un problema mediante una exploración intuitiva del espacio de búsqueda y son capaces de obtener una buena solución cercana al óptimo de forma rápida y sencilla (Quintero *et al.*, 2010; Alancay *et al.*, 2016). Las metaheurísticas son estrategias inteligentes de aproximación que combinan heurísticos tradicionales con estrategias eficientes de exploración del espacio de búsqueda, combinando la intensificación y diversificación de soluciones que permitan mejorar los procedimientos generales utilizados por las heurísticas (Melián *et al.*, 2003; Vélez y Montoya, 2007; Pinninghoff *et al.*, 2014).

La diferencia principal entre una heurística y una metaheurística es que, la metaheurística trata de salir de un óptimo local realizando una búsqueda guiada en el espacio de soluciones (Kong *et al.*, 2012). Entre las metaheurísticas más conocidas se encuentran: los algoritmos genéticos, búsqueda tabú, recocido simulado, búsqueda dispersa y colonias de hormigas; mientras que en las heurísticas destacan: la búsqueda local, multiarranque, ascenso en la montaña, búsqueda en vecindades variables y método de Monte Carlo (Hernandez *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2015a).

Las técnicas heurísticas tienen ventajas en la resolución de problemas de optimización cuando es complicado encontrar la mejor solución en un tiempo razonable utilizando un

método exacto, cuando el problema abordado es grande, es de naturaleza no lineal o cuando se requiere la incorporación de condiciones de modelado que difícilmente pueden ser resueltas por métodos exactos (Weeks *et al.*, 2014; Felton *et al.*, 2017).

En cuanto a desventajas, dado que las heurísticas son diseñadas para resolver un problema particular, es difícil que puedan usarse de manera general (Bettinger, *et al.*, 2009b; Hogansos y Meyer, 2015). Aun así, el beneficio que aportan estas técnicas en la resolución de problemas planteados de manera más realista y con menor rigidez justifican su uso en lugar de la aplicación de métodos exactos. La elección de una técnica para la resolución eficiente de un problema particular requiere considerar las propiedades siguientes: eficiencia, bondad y robustez. La eficiencia refiere al esfuerzo computacional necesario para obtener la solución, la bondad tiene que ver con la capacidad de obtener una solución que en promedio esté cerca de la solución óptima, y la robustez es un indicador de la probabilidad (baja) de obtener una mala solución (lejos del óptimo) (Martí, 2003).

La planificación del manejo forestal ha empleado diferentes técnicas de optimización, a partir de 1960, con propósito de asignar eficientemente los recursos disponibles bajo diferentes objetivos de manejo. Dependiendo del problema específico de gestión forestal, la optimización puede enfocarse en disminuir el desperdicio de recursos, reducir el tiempo de transporte, reducir los costos de gestión, mejorar las condiciones ecológicas y sociales, etc. Una forma común de optimizar el uso de los recursos por parte del dueño, es a través de la maximización del beneficio económico que este percibe a través del aprovechamiento de sus recursos (Vergara *et al.*, 2015; Kaya *et al.*, 2016).

En los últimos 20 años se han realizado numerosas investigaciones en las que se hace uso de métodos heurísticos para resolver problemas de planificación forestal complejos. Entre los más comunes se encuentran el método de Monte Carlo, el recocido simulado, la búsqueda tabú y diversos algoritmos genéticos (Sessions *et al.*, 2007; Quintero, 2009).

Específicamente, la técnica de recocido simulado se ha utilizado para resolver problemas de planificación forestal que abordan limitaciones de adyacencia espacial y problemas de

transporte forestal (Crowe y Nelson, 2005; Pukkala y Kurttila, 2005; Liu *et al.*, 2006; Pukkala y Heinonen, 2006; Chen y Gadow, 2008; Borges *et al.*, 2014; Banchmatiuk *et al.*, 2015 y Dong *et al.*, 2015b). Por su parte, los algoritmos genéticos han abordado problemas de programación de cosechas (Falcão y Borges, 2001; Ducheyne *et al.*, 2004), problemas que maximizan el valor presente (VP) con restricciones de producción máxima y mínima (Bettinger *et al.*, 2002; Rodrigues *et al.*, 2004), e incluso para resolver problemas de ordenamiento forestal en consideración de los hábitats existentes y su contribución ecológica (Hogansos y Meyer, 2015).

A continuación, se describen el modelo de la instancia (escenario real y cuantificable) definida para resolver el problema de optimización planteado en el Capítulo 2 y nueve métodos heurísticos propuestos para su resolución. Tres métodos son considerados heurísticas: búsqueda local simple (BLS), búsqueda local múltiple (BLM) y multiarranque (MTA); y los restantes se consideran metaheurísticas: recocido simulado en combinación con las tres heurísticas mencionadas (RBLS, RBLM y RMTA respectivamente), y un algoritmo genético en su versión simple además de dos variantes del mismo (GNS, GN2 y GN3).

2.4 Materiales y métodos

2.4.1 Formulación de la instancia

Para la formulación de la instancia (aplicación de datos reales al modelo formulado), se retomaron los datos y criterios de aprovechamiento del Programa de Manejo Forestal Maderable (PMFM) correspondiente al periodo 2016-2017/2025-2026 de la comunidad de San Pedro el Alto, Oaxaca. A continuación, se describen los supuestos considerados la instancia, así como los parámetros y variables de decisión necesarias para la evaluación de la función objetivo y descripción de las restricciones.

3.4.1.1 Supuestos de la instancia

- La superficie destinada para uso forestal no cambia durante el periodo de planificación.

- El bosque bajo manejo está conformado en su mayoría por especies de pino intolerantes.
- El bosque es gestionado siguiendo los principios estipulados en el sistema de manejo forestal conocido como Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI).
- La unidad mínima de manejo considerada dentro del bosque es el rodal (556 rodales).
- Se considera un turno técnico de 50 años y un ciclo de corta de 10 años. Considerando lo anterior, el horizonte de planeación de la instancia corresponde al ciclo de corta.
- Los tratamientos silvícolas (*T*) considerados en el manejo de la zona de aprovechamiento extensivo son:
 1. Primera cosecha comercial (a realizarse en el primer periodo del horizonte de planeación).
 2. Segunda cosecha comercial (a realizarse en el quinto periodo del horizonte de planeación).
 3. Tercera cosecha comercial (a realizarse en el último periodo del horizonte de planeación).
- Los tratamientos silvícolas (*T*) considerados en el manejo de la zona de aprovechamiento intensivo son:
 1. Corta de liberación (en rodales con edades menores a 7 años).
 2. Aclareo comercial ligero (en rodales con edades entre 8 y 28 años).
 3. Aclareo comercial normal (en rodales con edades entre 29 y 49 años).
 4. Corta de regeneración (en rodales con edades mayores a 49 años).
- Los tipos de productos maderables posibles a obtener son:
 1. Primario: troza de 2.55 m de longitud y diámetro con corteza > 25 cm.

2. Secundario: troza de 1.27 m de longitud y diámetro con corteza > 20 cm y < 25 cm.
 3. Celulósicos y otros: brazuelo de diámetro con corteza > 10 cm y < 20 cm.
- Las categorías de zonificación TRIAD (*K*) corresponden a:
 1. Zona de conservación ecológica y recuperación.
 2. Zona de aprovechamiento extensivo: conformada por rodales con el índice de sitio (IS) bajo o medio y con pendientes mayores al 70%).
 3. Zona de aprovechamiento intensivo (conformada por rodales con índice de sitio (IS) alto o muy alto y con pendientes menores al 70%).
 - Los 16 tipos de hábitat definidos para el caso particular dentro del bosque son:
 - 1 *Pinus montezumae* - *Quercus laurina*
 - 2 *Abies hickelii* - *Pinus montezumae*
 - 3 *Pinus douglasiana* - *Pinus teocote*
 - 4 *Pinus douglasiana* – *Quercus scytophylla*
 - 5 *Pinus pseudostrobus* - *Pinus patula*
 - 6 *Pinus montezumae* - *Abies hickelii*
 - 7 *Pinus oaxacana* - *Pinus douglasiana*
 - 8 *Pinus teocote* – *Pinus oaxacana*
 - 9 *Pinus teocote* – *Quercus magnoliifolia*
 - 10 *Pinus douglasiana* – *Pinus oaxacana*
 - 11 *Pinus patula* – *Pinus douglasiana*
 - 12 *Pinus patula* – *Pinus montezumae*
 - 13 *Pinus douglasiana* – *Pinus patula*
 - 14 *Pinus douglasiana* - *Pinus pringlei*
 - 15 *Pinus montezumae* – *Pinus patula*
 - 16 *Pinus pringlei* – *Pinus douglasiana*
 - La prioridad de conservación de cada tipo de hábitat se determinará mediante la extensión de superficie ocupada por el mismo dentro del bosque.
 - La tasa de crecimiento del volumen de madera en el bosque dependerá del incremento medio anual (IMA) de los árboles en pie y de la edad del rodal en un periodo *j*.

2.4.1.2 Índices

i : contabiliza los i -ésimos rodales $i = 1, \dots, N$

j : contabiliza los j -ésimos periodos (años) de planeación de la cosecha $j = 1, \dots, J$

t : contabiliza los t -ésimos tratamientos silvícolas posibles de prescripción $t = 1, \dots, T$

k : contabiliza los k -ésimas categorías de zonificación de la masa forestal $k = 1, \dots, K$

a : contabiliza los a -ésimos tipos de habitat presentes en el bosque $a = 1, \dots, A$

q : contabiliza los q -ésimos productos maderables posibles de obtener $q = 1, \dots, Q$

2.4.1.3 Parámetros

DP_{11} : 80% del volumen maderable cosechado (m^3) por la corta de liberación destinado a la producción de primarios.

DP_{14} : 70% del volumen maderable cosechado (m^3) por la corta de regeneración destinado a la producción de primarios.

DP_{17} : 40% del volumen maderable cosechado (m^3) por la tercera cosecha comercial destinado a la producción de primarios.

DP_{21} : 15% del volumen maderable cosechado (m^3) por la corta de liberación destinado a la producción de secundarios.

DP_{22} : 60% del volumen maderable cosechado (m^3) por el aclareo ligero destinado a la producción de secundarios.

DP_{23} : 60% del volumen maderable cosechado (m^3) por el aclareo normal destinado a la producción de secundarios.

DP_{24} : 20% del volumen maderable cosechado (m^3) por la corta de regeneración destinado a la producción de secundarios.

DP_{25} : 60% del volumen maderable cosechado (m^3) por la primera cosecha comercial destinado a la producción de secundarios.

DP_{26} : 60% del volumen maderable cosechado (m^3) por la segunda cosecha comercial destinado a la producción de secundarios.

DP_{27} : 45% del volumen maderable cosechado (m^3) por la tercera cosecha comercial destinado a la producción de secundarios.

DP_{31} : 5% del volumen maderable cosechado (m^3) por la corta de liberación destinado a la producción de celulósicos y otros.

DP_{32} : 40% del volumen maderable cosechado (m^3) por el aclareo ligero destinado

a la producción de celulósicos y otros.

DP_{33} : 40% del volumen maderable cosechado (m^3) por el aclareo normal destinado a la producción de celulósicos y otros.

DP_{34} : 10% del volumen maderable cosechado (m^3) por la corta de regeneración destinado a la producción de celulósicos y otros.

DP_{35} : 40% del volumen maderable cosechado (m^3) por la primera cosecha comercial destinado a la producción de celulósicos y otros.

DP_{36} : 40% del volumen maderable cosechado (m^3) por la segunda cosecha comercial destinado a la producción de celulósicos y otros.

DP_{37} : 15% del volumen maderable cosechado (m^3) por la tercera cosecha comercial destinado a la producción de celulósicos y otros.

Scd : 2, 500 hectáreas máximas deseables para conservación y recuperación

S_a : Superficie ocupada por el tipo de hábitat a (ha) en el área forestal.

S_i : Superficie correspondiente al rodal i en hectáreas.

LS_a : Superficie máxima (ha) a destinar para conservación del hábitat a .

Llr_j : capacidad mínima de procesamiento del aserradero de 40,000 m^3 .

I_{ij} : Incremento en volumen maderable (m^3) para el rodal i en el periodo j .

IMA_{ij+1} : $IMA_j \cdot e^{-\theta \cdot (E_2 - E_2)}$

e_{ij} : Edad del rodal i (años) en el periodo j .

Hl : 12, 525.96 hectáreas bajo concepto de litigio.

Ae : 29, 682.11 hectáreas propiedad de la comunidad forestal.

VE_{ij} : volumen maderable (m^3) existente en el rodal i en el periodo j .

Ml_j : 80,000 m^3 mínimos a extraer en el periodo j .

Mh_j : 150,000 m^3 máximos a extraer en el periodo j .

Gl_1 : intensidad de corta mínima del 85% del volumen existente para corta de liberación.

Gh_1 : intensidad de corta máxima del 95% del volumen existente para corta de liberación.

Gl_2 : intensidad de corta mínima del 60% del volumen existente para aclareo ligero.

Gh_2 : intensidad de corta máxima del 70% del volumen existente para aclareo ligero

Gl_3 : intensidad de corta mínima del 60% del volumen existente para aclareo normal.

Gh_3 : intensidad de corta máxima del 75% del volumen existente para aclareo normal.

Glh_4 : intensidad de corta del 95% del volumen existente para corta de regeneración.

Glh_5 : intensidad de corta del 50% del volumen existente para primera cosecha comercial.

Glh_6 : intensidad de corta del 45% del volumen existente para segunda cosecha comercial.

Glh_7 : intensidad de corta del 60% del volumen existente para tercera cosecha comercial.

Pc : \$1,000 por hectárea mantenida en la zona de conservación.

Pp : \$1,452 por m^3 para productos primarios.

Ps : \$833 por m^3 para productos secundarios.

Po : \$433 por m^3 para productos celulósicos y otros.

Pe : \$1000 por unidad contabilizada en la variable de interés.

$h_{i1} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 1} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i2} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 2} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i3} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 3} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i4} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 4} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i5} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 5} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i6} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 6} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i7} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 7} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i8} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 8} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i9} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 9} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i10} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 10} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i11} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 11} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i12} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 12} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i13} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 13} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i14} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 13} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i15} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 14} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$h_{i16} \begin{cases} 1 & \text{si el rodal } i \text{ es representativo del hábitat 15} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

$$\begin{aligned}
SE_{11} & \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } g_{11} \leq 0 \\ \mathbf{S}_a - \mathbf{LS}_a & \text{si } g_{11} > 0 \end{cases} \\
SE_{12} & \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } g_{12} \leq 0 \\ \mathbf{S}_a - \mathbf{LS}_a & \text{si } g_{12} > 0 \end{cases} \\
SE_{13} & \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } g_{13} \leq 0 \\ \mathbf{S}_a - \mathbf{LS}_a & \text{si } g_{13} > 0 \end{cases} \\
SE_{14} & \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } g_{14} \leq 0 \\ \mathbf{S}_a - \mathbf{LS}_a & \text{si } g_{14} > 0 \end{cases} \\
SE_{15} & \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } g_{15} \leq 0 \\ \mathbf{S}_a - \mathbf{LS}_a & \text{si } g_{15} > 0 \end{cases} \\
SE_{16} & \begin{cases} \mathbf{0} & \text{si } g_{16} \leq 0 \\ \mathbf{S}_a - \mathbf{LS}_a & \text{si } g_{16} > 0 \end{cases}
\end{aligned}$$

$$g_1 = S_1 - LS_1 \dots g_{16} = S_{16} - LS_{16}$$

$$e_{ij+1} = e_{ij} + 1$$

$$VE_{ij+1} := VE_{ij} + I_{ij} - X_{itj}$$

$$I_{ij} = IMA_{ij} \cdot S_i$$

2.4.1.4 Variables de decisión

$$y_{i1} \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si el rodal } i \text{ es asignado a la zona de conservación} \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$y_{i2} \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si el rodal } i \text{ es asignado a la zona de aprovechamiento extensivo} \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$y_{i3} \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si el rodal } i \text{ es asignado a la zona de aprovechamiento intensivo} \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$U_{ii',j} \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si el rodal } i \text{ y el rodal } i' \text{ son aprovechados en el periodo } j \text{ y son colindantes} \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$PT_i \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si el rodal } i \text{ es asignado a la zona } k \text{ de acuerdo a su potencial} \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_1 \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si en el periodo 1 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_2 \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si en el periodo 2 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_3 \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si en el periodo 3 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_4 \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si en el periodo 4 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_5 \begin{cases} \mathbf{1} & \text{si en el periodo 5 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ \mathbf{0} & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_6 \begin{cases} 1 & \text{si en el periodo 6 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_7 \begin{cases} 1 & \text{si en el periodo 7 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_8 \begin{cases} 1 & \text{si en el periodo 8 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_9 \begin{cases} 1 & \text{si en el periodo 9 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$F_{10} \begin{cases} 1 & \text{si en el periodo 10 el volumen maderable a extraer es mayor a } 150,000 \text{ m}^3 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

α : Superficie determinada para la zona de conservación (ha).

α_1 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 1.

α_2 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 2.

α_3 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 3.

α_4 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 4.

α_5 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 5.

α_6 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 6.

α_7 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 7.

α_8 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 8.

α_9 : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 9.

α_{10} : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 10.

α_{11} : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 11.

α_{12} : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 12.

α_{13} : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 13.

α_{14} : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 14

α_{15} : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 15

α_{16} : Superficie total determinada para conservación (ha) del hábitat 16

Sc_1 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 1.

Sc_2 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 2.

Sc_3 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 3.

Sc_4 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 4.

Sc_5 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 5.

Sc_6 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 6.

Sc_7 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 7.
 Sc_8 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 8.
 Sc_9 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 9.
 Sc_{10} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 10.
 Sc_{11} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 11.
 Sc_{12} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 12.
 Sc_{13} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 13.
 Sc_{14} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 14.
 Sc_{15} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 15.
 Sc_{16} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la total ocupada por el hábitat 16.
 DDC : Déficit de superficie por asignar a para conservación (ha)
 ST_1 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 1 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_1 .
 ST_2 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 2 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_2 .
 ST_3 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 3 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_3 .
 ST_4 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 4 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_4 .
 ST_5 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 5 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_5 .
 ST_6 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 6 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_6 .
 ST_7 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 7 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_7 .
 ST_8 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 8 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_8 .
 ST_9 : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 9 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_9 .
 ST_{10} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 10 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_{10} .
 ST_{11} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 11 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_{11} .

ST_{12} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 12 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_{12} .

ST_{13} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 13 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_{13} .

ST_{14} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 16 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_{14} .

ST_{15} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 17 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_{15} .

ST_{16} : Superficie seleccionada para conservación (ha) de la superficie restante del hábitat 18 para completar el déficit DDC , una vez seleccionada Sc_{16} .

β_1 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 1

β_2 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 2

β_3 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 3

β_4 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 4

β_5 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 5

β_6 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 6

β_7 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 7

β_8 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 8

β_9 : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 9

β_{10} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo 10

β_{j1} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo j en función de la corta de liberación.

β_{j2} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo j en función del aclareo ligero.

β_{j3} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo j en función del aclareo normal.

β_{j4} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo j en función de la corta de regeneración.

β_{j5} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo j en función de la 1ra cosecha comercial.

β_{j6} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo j en función de la 2da cosecha comercial.

β_{j7} : Volumen maderable a extraer (m^3) en el periodo j en función de la 3ra cosecha comercial.

O_{1j} : Volumen maderable a extraer (m^3) requerido para la obtención de productos primarios en el periodo j .

O_{2j} : Volumen maderable a extraer (m^3) requerido para la obtención de productos secundarios en el periodo j .

O_{3j} : Volumen maderable a extraer (m^3) requerido para la obtención de productos terciarios en el periodo j .

X_{itj} : Volumen maderable a extraer (m^3) del rodal i en función del tratamiento silvícola t en el periodo j .

V_{iktj} : Volumen maderable a extraer (m^3) del rodal i perteneciente a la zona k en función del tratamiento silvícola t para el periodo j .

2.4.2 Técnicas heurísticas

2.4.2.1 Búsqueda local simple

La técnica de búsqueda local simple, también conocida como búsqueda por vecindad, se basa en el concepto de explorar de manera iterativa el vecindario de una solución aleatoria inicial, hasta que no se obtenga mejora en la misma (Michallet *et al.*, 2014). El vecindario se conforma por soluciones vecinas, generadas a través de posibles modificaciones en la solución inicial y el conjunto de modificaciones posibles a la solución conforma el espacio de soluciones del problema de optimización (Torres *et al.*, 2008; Alancay *et al.*, 2016; Bento *et al.*, 2018).

El criterio de mejora corresponde a un incremento en el valor de la función objetivo. Si una nueva solución (solución vecina) presenta un incremento en el valor de la función objetivo, sustituye a la solución anterior, de lo contrario la solución anterior permanece sin cambios (Figura 2.1). El proceso anterior se realiza hasta que se cumpla con el criterio de paro, que generalmente es cierto número de iteraciones (Kesilmiş y Karabacak, 2017; Montes, 2017). Esta técnica ha sido aplicada con éxito a una gama amplia de problemas, generando soluciones de buena calidad (Verhoeven y Arts, 1995; Cruz y Díaz, 2009; Ohsaki y Yamakawa, 2018).

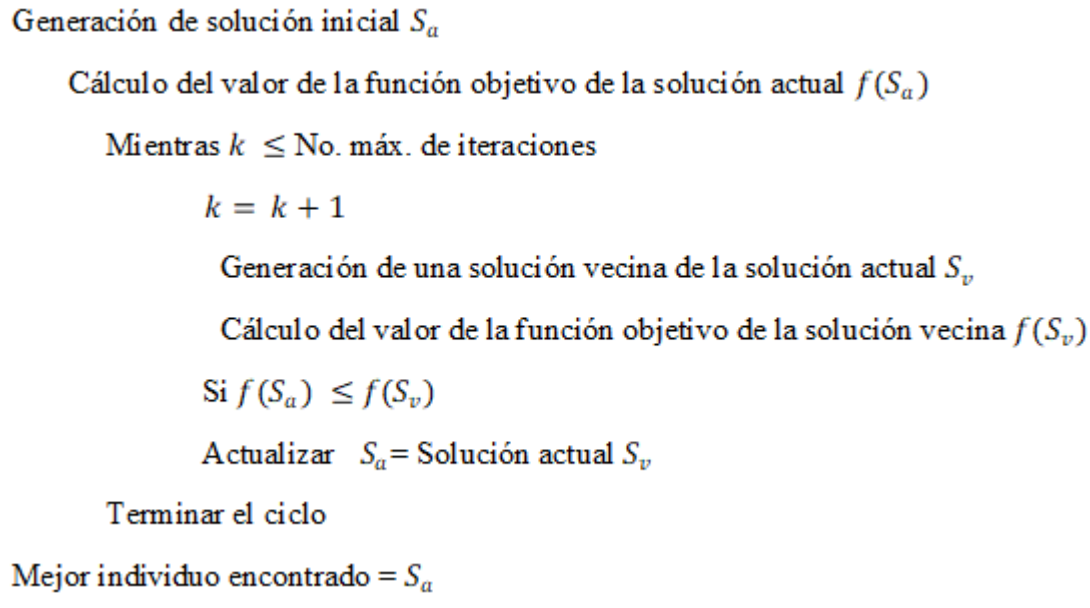


Figura 2.1 Pseudocódigo del algoritmo búsqueda local simple.

Un punto crucial de esta técnica es conseguir una evaluación rápida de los movimientos, tanto en términos de factibilidad como de rentabilidad (Michallet *et al.*, 2014). Su principal desventaja radica en que puede ser lenta para encontrar una solución óptima o muy cercana al óptimo (Vélez *et al.*, 2003). Para el caso particular, el criterio utilizado para la selección de la mejor solución corresponde a las reglas definidas por Coello *et al.* (2007), las cuales permiten guiar al algoritmo a la región factible del espacio de búsqueda: a) entre 2 soluciones factibles, gana la que tiene el mayor valor en la función objetivo; b) si una solución es factible y la otra es no factible, la solución factible gana y c) si ambas soluciones son no factibles, se prefiere la que tenga menor número de violaciones a las restricciones del problema.

El algoritmo construido para la resolución del modelo, inició con un conjunto de 192 soluciones aleatorias, del cual se seleccionó la solución inicial (solución factible con el mayor valor en la función objetivo). El número de iteraciones se fijó en 1628 y se generaron un total de 11 vecinos para la solución inicial factible, lo anterior para ejecutar un total de 18,100 evaluaciones a la función objetivo. El número de evaluaciones a la función objetivo se determinó empíricamente en función de las evaluaciones realizadas por las técnicas de mayor complejidad (algoritmos genéticos), debido a que presentaron alta consistencia en la

obtención de soluciones de buena calidad en un tiempo de cómputo manejable para realizar las pruebas experimentales.

3.4.2.2 Búsqueda local múltiple

La técnica de búsqueda local múltiple es uno de los métodos basados en búsquedas locales simples simultáneas (Öztürk, 2017). Comienza con un conjunto de soluciones iniciales aleatorias, y para cada solución inicial se genera aleatoriamente un determinado número de vecinos. Posteriormente se realiza una operación de reordenamiento y si alguna de las soluciones vecinas presenta un valor de la función objetivo mayor al presentado por la solución inicial se hace el reemplazo y se conforma nuevamente el conjunto de soluciones. El proceso se repite cierto número de veces hasta cumplir con el criterio de paro (Figura 2.2) y la mejor solución encontrada será la salida del algoritmo (Hifi *et al*, 2010; Jian y Chan, 2015; Badr *et al.*, 2016).

Esta técnica, presenta una gran mejora al usar múltiples soluciones, en lugar de usar una única solución en cada ejecución, permitiendo mejorar la distribución inicial en el espacio de soluciones y abandonar las búsquedas infructuosas (Makrymanolakis *et al.*, 2016; Pasquale, 2017; Öztürk, 2018). La idea detrás de este método es que la mejor solución posible es una de las mejores soluciones evaluadas en cualquier momento del proceso (Walliser, 2012; Walliser, 2015).

El algoritmo de búsqueda local múltiple construido, para el caso de estudio, utilizó las reglas de Coello para la selección de la mejor solución además considera un criterio de “diversidad” retomado del concepto básico de la técnica heurística de búsqueda dispersa, el cual trabaja inicialmente sobre un conjunto pequeño de soluciones y posteriormente las combina para crear otras nuevas que en principio no tienen que ser necesariamente factibles (Glover *et al.*, 2000; Casado y Martí, 2007).

Este criterio fue ejecutado a través de una función que, para conformar el nuevo conjunto de soluciones, selecciona a la mitad de las soluciones por su nivel de aptitud (mayor valor en la función objetivo) y a la mitad restante por su diversidad en el valor de la función objetivo

(soluciones drásticamente diferentes a las demás); evitando la convergencia prematura del algoritmo y facilitando el proceso de búsqueda.

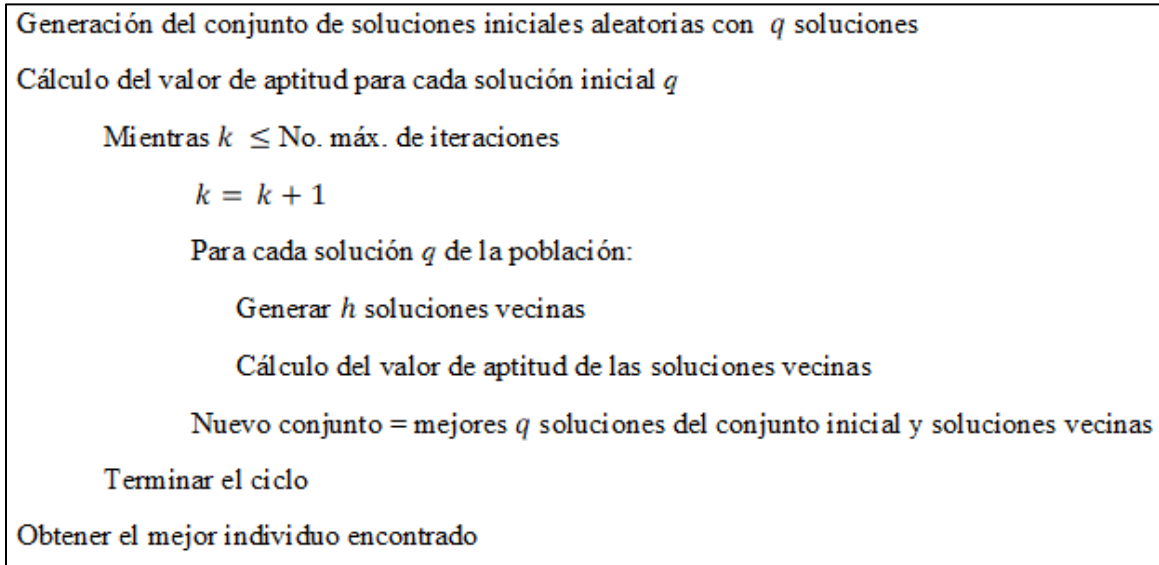


Figura 2.2 Pseudocódigo del algoritmo búsqueda local múltiple.

Para la resolución del modelo, el algoritmo inició con 100 soluciones aleatorias, de las cuales únicamente 10 fueron seleccionadas a través del criterio de diversidad, para conformar el conjunto de soluciones iniciales. Dicho criterio de aptitud, fue retomado nuevamente de las reglas de Coello y para cada solución inicial se generaron 15 soluciones vecinas. El número de iteraciones se fijó en 120 para ejecutar un total de 18,100 evaluaciones a la función objetivo.

2.4.2.3 Multiarranque

La técnica de multiarranque consiste básicamente en la repetición de generar una solución inicial y realizar una búsqueda local (Martí y Moreno, 2003; Ugray *et al.*, 2005). El algoritmo de multiarranque consta de dos fases: la fase de construcción, encargada de generar una solución inicial aleatoria, y la fase de búsqueda local simple, la cual intenta mejorar la calidad de la solución inicial. Como resultado de cada iteración se obtiene una mejor solución local y la mejor de todas ellas (mejor solución global) es la salida del algoritmo (Figura 2.3).

Los procedimientos de multiarranque fueron concebidos como una forma de explotar un procedimiento de búsqueda local. Actualmente esta técnica busca lograr diversidad en las soluciones obtenidas del entorno de solución, a través de la exploración de diferentes vecindarios. Estos procedimientos han demostrado un desempeño exitoso en la resolución de problemas de optimización de tipo no lineal y para una amplia gama de problemas complejos del mundo real (Hedar y Fukushima, 2006; López *et al.*, 2014; Martí *et al.*, 2017a).

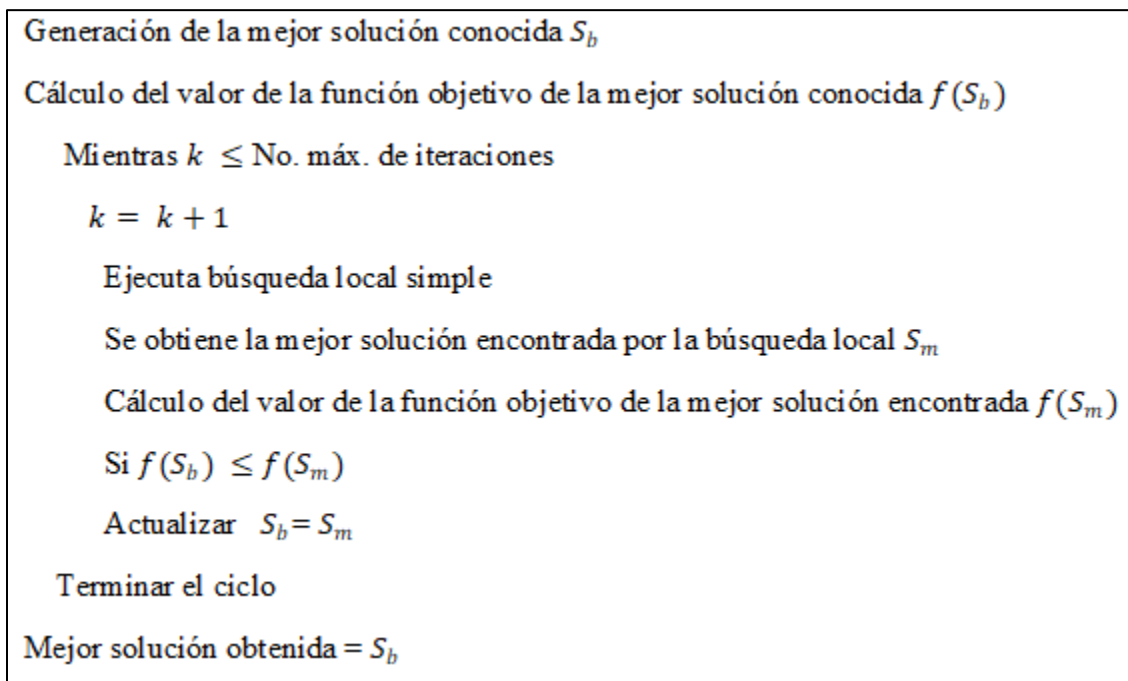


Figura 2.3 Pseudocódigo del algoritmo multiarranque.

Los parámetros utilizados para la técnica multiarranque en el presente trabajo, corresponden a 100 soluciones iniciales para obtener la “mejor solución conocida” y el número de iteraciones se fijó en 40. Los parámetros definidos para la búsqueda local simple, fueron 10 vecinos para la solución inicial y un total de 35 iteraciones. Se realizaron un total de 18,100 evaluaciones a la función objetivo y al igual que las técnicas anteriormente descritas, el criterio de selección de “la mejor solución” son las reglas de Coello.

2.4.3 Técnicas metaheurísticas

2.4.3.1 Recocido simulado

La técnica de recocido simulado es una metaheurística que simula el proceso de recocido de sólidos para la resolución de problemas de optimización (Borges *et al.*, 2014; Banchmatiuk *et al.*, 2015). La característica principal de esta técnica es la exploración del espacio de soluciones que permite escapar de óptimos locales, aceptando soluciones inferiores a la solución actual en base a una probabilidad especificada en el algoritmo (Torres *et al.*, 2008; Kuloglu, 2014).

El recocido simulado consiste principalmente en partir de una solución inicial y paulatinamente transformarla a través de pequeños cambios definidos por el cambio en la temperatura en el algoritmo (de Michelli, 2009). Cada iteración considera un número determinado de vecinos de la solución inicial, y probabilísticamente decide entre cambiar el sistema a la mejor solución vecina encontrada o quedarse con la solución actual, lo que hace que el algoritmo finalmente tienda a seleccionar las mejores soluciones. Este paso se repite hasta que se alcanza una temperatura final deseable (Figura 2.4).

Los parámetros necesarios para ejecutar la técnica de recocido simulado son: una temperatura inicial, el número de iteraciones permitidas en cada temperatura, la velocidad de enfriamiento y la temperatura final a la que finaliza la búsqueda (Borges *et al.*, 2014). La elección de la temperatura se debe realizar con bastante precaución, pues esta debe ser lo suficientemente alta para permitir el libre cambio de soluciones vecinas durante el proceso y asegurar que la solución final sea independiente de la solución inicial; pero no demasiado baja pues implicaría reducir la posibilidad de explorar posibles soluciones que sean mejor a la inicial (Cruz y Díaz, 2009; Mao *et al.*, 2015).

En cuanto al proceso de reducción de la temperatura, será definido por el número de iteraciones a realizar antes de reducir la temperatura del sistema y generalmente el criterio de paro se cumple cuando no existe mejoría en la solución obtenida por el algoritmo (Alancay *et al.*, 2016).

Para la técnica de recocido simulado con búsqueda local simple (RBLs), la temperatura inicial se fijó en 850° y la temperatura final en 0.1° , con un total de 19 iteraciones por cambio de temperatura. Para el proceso de la búsqueda local simple se especificó iniciar con 100 soluciones aleatorias y generar 10 vecinos. En la técnica de recocido simulado con búsqueda local múltiple (RBLM) la temperatura inicial fue definida en 10° y la temperatura final en 0.1° , con 7 iteraciones por cambio de temperatura, y para el proceso de búsqueda local múltiple se generaron 64 soluciones iniciales de las cuales solo 8 conformaron la población inicial y de cada individuo se obtuvieron 15 vecinos. Por último, para la técnica de recocido simulado con multiarranque (RMLTA), se utilizó una temperatura inicial de 5° y una temperatura final de 0.1° , con 7 iteraciones por cambio de temperatura. El proceso de multiarranque consideró 10 soluciones aleatorias para seleccionar la mejor conocida, y se generaron 4 vecinos para la solución inicial y un total de 5 iteraciones.

```

Definición de una  $T^\circ$  inicial y una tasa de disminución de la  $T^\circ$  ( $\alpha$ )
Generación una solución inicial  $S_a$ 
Cálculo del valor de la función objetivo de la solución inicial  $f(S_a)$ 
Mientras  $T^\circ > T^\circ$  final
  Mientras  $k \leq$  No. máx. de iteraciones
    Generación de una solución vecina de la solución actual  $S_v$ 
    Cálculo del valor de la función objetivo de la solución vecina  $f(S_v)$ 
    Cálculo de  $\Delta E = f(S_v) - f(S_a)$ 
    Si  $\Delta E < 0$  Actualizar  $S_a = S_v$ 
    Si  $\Delta E \geq 0$  Actualizar  $S_a = S_v$  con una probabilidad  $P(\Delta E)$ 
     $k = k + 1$ 
  Termina el ciclo
   $T^\circ = \alpha \cdot T^\circ$ 
Termina el ciclo
Mejor solución obtenida =  $S_a$ 

```

Figura 2.4 Pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado.

Todas las técnicas de recocido simulado utilizaron las reglas de Coello como criterio de aptitud y realizaron 18,100 evaluaciones a la función objetivo cada una y utilizaron una tasa de disminución de la temperatura de tipo exponencial (ecuación 2.1), en donde el parámetro α por lo general retoma un rango de 0.9 a 0.99, y para el caso particular se asignó un valor de 0.9.

$$T_{k+1} = \alpha * T_k \quad (2.1)$$

donde

T_{k+1} es la temperatura en la iteración $k + 1$

T_k es la temperatura en la iteración k

2.4.3.2 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos se definen como técnicas de búsqueda basados en los principios de la selección natural y de la genética natural, pues combinan la supervivencia del individuo más apto generado a partir del intercambio de información entre individuos (Bettinger *et al.*, 2002; Ferrero y Mas, 2005; García *et al.* 2017). Simulando un proceso biológico, se parte de un conjunto de soluciones iniciales aleatorias (población inicial) que representan soluciones al problema. Posteriormente, este conjunto evoluciona mediante la aplicación de operadores evolutivos que combinan y modifican a las soluciones iniciales creando un nuevo conjunto de soluciones.

Habitualmente se trabajan tres operadores genéticos: selección, cruza y mutación (Montes, 2017; Pasquale, 2017). Mediante un proceso de selección algunas soluciones iniciales se definen como “padres” para su posterior reproducción, y adicionalmente se emplea un operador de mutación aleatoria que modificará la composición de otras soluciones iniciales con el fin de mejorar la diversidad en el conjunto de soluciones. Por lo tanto, sobrevivirán las soluciones mejor adaptadas (las más cercanas al óptimo buscado), y estas formarán parte del nuevo conjunto de soluciones (Boston y Bettinger, 2002; Ferrero y Mas, 2005; Suesca *et al.*, 2016). Los procesos de evaluación, selección, reproducción y mutación se repiten hasta que se alcanza el criterio de paro especificado (Figura 2.5).

Los algoritmos genéticos han sido diseñados para buscar soluciones en espacios no lineales, de gran dimensión y con aplicación de optimización en casos reales de diversos campos de investigación (Moore *et al*, 2000; Prüngel-Bennett, 2004; Pasquale, 2017). Para el caso de estudio, en el algoritmo genético simple (GNS) se generaron 300 soluciones iniciales de las cuales se seleccionaron 21 soluciones, utilizando las reglas de Coello, para conformar el conjunto de soluciones iniciales aleatorias. Posteriormente, se seleccionaron de forma aleatoria cuatro soluciones iniciales de dicho conjunto y mediante un proceso de torneo binario (comparaciones pareadas) se seleccionaron las dos mejores soluciones para obtener a los “padres” candidatos para la cruce. El proceso de cruce se realizó en un punto, lo cual dio origen a dos nuevas soluciones (hijos). Se aplicó una probabilidad de mutación aleatoria del 9 % para los hijos generados y también la mutación ocurrió en un punto. El criterio de paro considero cumplir un total de 445 iteraciones.

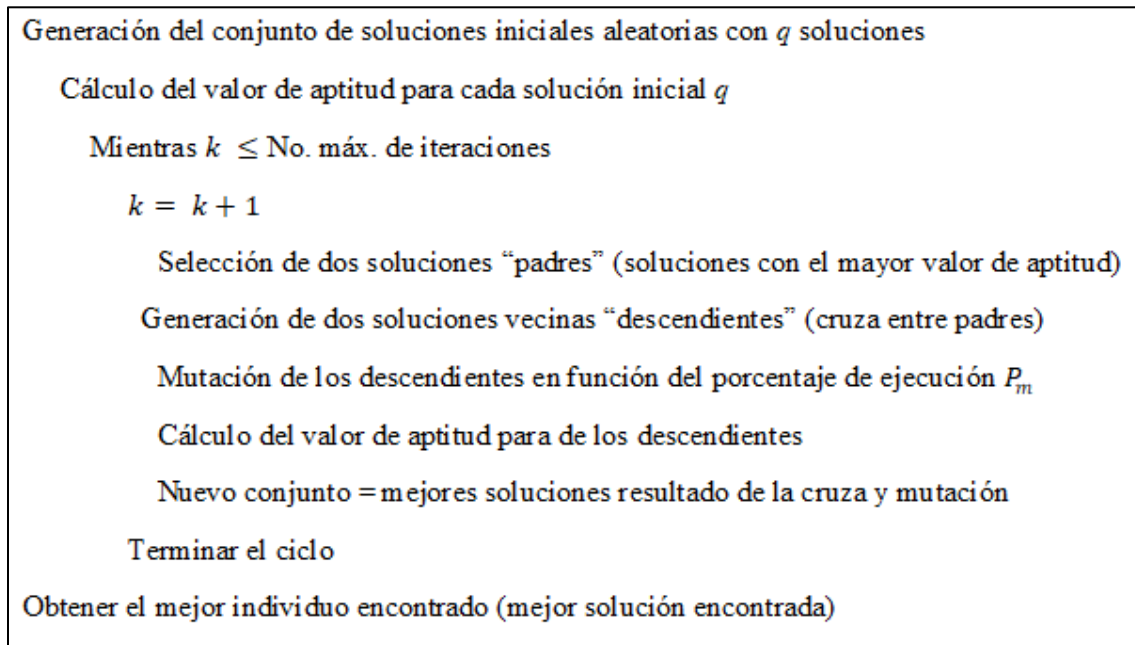


Figura 2.5 Pseudocódigo del algoritmo genético.

Referente al algoritmo genético de mutación múltiple (GN2), este corresponde a primera variante de la técnica GNS, en donde la modificación se realizó en el proceso de mutación. La mutación se ejecutó en tres puntos de la solución con la misma probabilidad del 9 % y el mismo número de iteraciones.

Finalmente, el algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo (GN3) corresponde a la segunda variante de la técnica GNS, en donde además de integrar la mutación en tres puntos, se utilizó una función de mejora para seleccionar a las soluciones que conformarán las nuevas generaciones.

A diferencia de las técnicas GNS y GN2 que conforman al nuevo conjunto de soluciones únicamente con las mejores soluciones generadas por los operadores genéticos, la técnica de GN3 utiliza la función de mejora para conformar el nuevo conjunto tanto con las soluciones producto de los operadores genéticos como con aquellas mejores soluciones provenientes del conjunto de soluciones iniciales (conjunto del cual provienen los padres). Lo anterior permite incrementar la diversidad de las soluciones posibles a obtener.

Para la técnica GN3 el conjunto inicial considero 20 soluciones aleatorias, la probabilidad de mutación fue del 8 % y el número de iteraciones fue el mismo que en las técnicas anteriores. Nuevamente las reglas de Coello se retomaron para determinar la aptitud de las soluciones y los parámetros definidos para todos los algoritmos genéticos fueron calibrados para cumplir con un total de 18,100 evaluaciones a la función objetivo.

2.5 Resultados y discusión

2.5.1 Modelo de la instancia

$$\max Z = C_1 + C_2 + C_3 - C_4 - C_5 \quad (1.1)$$

donde

$$C_1 = \sum_{j=1}^{10} \left(\frac{1000}{(1.04)^j} \right) \cdot \alpha \quad (1.2)$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^{10} \left(\frac{1452}{(1.04)^j} \right) \cdot O_{1j} + \sum_{j=1}^{10} \left(\frac{833}{(1.04)^j} \right) \cdot O_{2j} + \sum_{j=1}^{10} \left(\frac{433}{(1.04)^j} \right) \cdot O_{3j} \quad (1.3)$$

$$C_3 = -\left(\frac{12,525.96}{29,682.11}\right) \cdot \left(\sum_{j=1}^{10} \sum_{i=1}^{556} U_{ii',j} \cdot \left(\frac{1000}{(1.04)^j}\right)\right) \quad (1.4)$$

$$C_4 = \sum_{i=1}^{556} \sum_{j=1}^{10} W_i \cdot \left(\frac{1000}{(1.04)^j}\right) \quad (1.5)$$

$$C_5 = \sum_{j=1}^{10} F_j \cdot \left(\frac{1000}{(1.04)^j}\right) \quad (1.6)$$

sujeto a

$$\alpha = \sum_{a=1}^{16} \alpha_a \quad (2.1)$$

$$\alpha_1 = Sc_1 + ST_1 \quad (2.2)$$

$$\alpha_2 = Sc_2 + ST_2 \quad (2.3)$$

$$\alpha_3 = Sc_3 + ST_3 \quad (2.4)$$

$$\alpha_4 = Sc_4 + ST_4 \quad (2.5)$$

$$\alpha_5 = Sc_5 + ST_5 \quad (2.6)$$

$$\alpha_6 = Sc_6 + ST_6 \quad (2.7)$$

$$\alpha_7 = Sc_7 + ST_7 \quad (2.8)$$

$$\alpha_8 = Sc_8 + ST_8 \quad (2.9)$$

$$\alpha_9 = Sc_9 + ST_9 \quad (2.10)$$

$$\alpha_{10} = Sc_{10} + ST_{10} \quad (2.11)$$

$$\alpha_{11} = Sc_{11} + ST_{11} \quad (2.12)$$

$$\alpha_{12} = Sc_{12} + ST_{12} \quad (2.13)$$

$$\alpha_{13} = Sc_{13} + ST_{13} \quad (2.14)$$

$$\alpha_{14} = Sc_{14} + ST_{14} \quad (2.15)$$

$$\alpha_{15} = Sc_{15} + ST_{15} \quad (2.16)$$

$$\alpha_{16} = Sc_{15} + ST_{16} \quad (2.17)$$

$$DDC = Scd - \sum_{a=1}^{16} Sc_a \quad (2.18)$$

$$\sum_{a=1}^{16} ST_a = DDC \quad (2.19)$$

$$ST_1 \leq SE_1 \quad (2.20)$$

$$ST_2 \leq SE_2 \quad (2.21)$$

$$ST_3 \leq SE_3 \quad (2.22)$$

$$ST_4 \leq SE_4 \quad (2.23)$$

$$ST_5 \leq SE_5 \quad (2.24)$$

$$ST_6 \leq SE_6 \quad (2.25)$$

$$ST_7 \leq SE_7 \quad (2.26)$$

$$ST_8 \leq SE_8 \quad (2.27)$$

$$ST_9 \leq SE_9 \quad (2.28)$$

$$ST_{10} \leq SE_{10} \quad (2.29)$$

$$ST_{11} \leq SE_{11} \quad (2.30)$$

$$ST_{12} \leq SE_{12} \quad (2.31)$$

$$ST_{13} \leq SE_{13} \quad (2.32)$$

$$ST_{14} \leq SE_{14} \quad (2.33)$$

$$ST_{15} \leq SE_{15} \quad (2.34)$$

$$ST_{16} \leq SE_{16} \quad (2.35)$$

$$\sum_{k=1}^3 y_{ik} = 1 \quad (2.36)$$

$$\beta_j = \beta_{j1} + \beta_{j2} + \beta_{j3} + \beta_{j4} + \beta_{j5} + \beta_{j6} + \beta_{j7} \quad (2.37)$$

$$\beta_{j1} = \sum_{i=1}^{556} X_{i1j} \quad (2.38)$$

$$\beta_{j2} = \sum_{i=1}^{556} X_{i2j} \quad (2.39)$$

$$\beta_{j3} = \sum_{i=1}^{556} X_{i3j} \quad (2.40)$$

$$\beta_{j4} = \sum_{i=1}^{556} X_{i4j} \quad (2.41)$$

$$\beta_{j5} = \sum_{i=1}^{556} X_{i5j} \quad (2.42)$$

$$\beta_{j6} = \sum_{i=1}^{556} X_{i6j} \quad (2.43)$$

$$\beta_{j7} = \sum_{i=1}^{556} X_{i7j} \quad (2.44)$$

$$X_{i1j} = V_{ik1j} \cdot Y_{i3} \cdot W_{i1j} \quad (2.45)$$

$$X_{i2j} = V_{ik2j} \cdot Y_{i3} \cdot W_{i2j} \quad (2.46)$$

$$X_{i3j} = V_{ik3j} \cdot Y_{i3} \cdot W_{i3j} \quad (2.47)$$

$$X_{i4j} = V_{ik4j} \cdot Y_{i3} \cdot W_{i4j} \quad (2.48)$$

$$X_{i5j} = V_{ik5j} \cdot Y_{i2} \cdot W_{i5j} \quad (2.49)$$

$$X_{i6j} = V_{ik6j} \cdot Y_{i2} \cdot W_{i6j} \quad (2.50)$$

$$X_{i7j} = V_{ik7j} \cdot Y_{i2} \cdot W_{i7j} \quad (2.51)$$

$$O_{1j} = 0.80 \cdot \beta_{j1} + 0.70 \cdot \beta_{j4} + 0.40 \cdot \beta_{j7} \quad (2.52)$$

$$O_{2j} = 0.15 \cdot \beta_{j1} + 0.60 \cdot (\beta_{j2} + \beta_{j3} + \beta_{j5} + \beta_{j6}) + 0.20 \cdot \beta_{j4} + 0.40 \cdot \beta_{j7} \quad (2.53)$$

$$O_{3j} = 0.05 \cdot \beta_{j1} + 0.40 \cdot (\beta_{j2} + \beta_{j3} + \beta_{j5} + \beta_{j6}) + 0.10 \cdot \beta_{j4} + 0.15 \cdot \beta_{j7} \quad (2.54)$$

$$80,000 \leq \beta_j \leq 150,000 \quad (2.55)$$

$$40,000 \leq O_{1j} + O_{2j} \quad (2.56)$$

$$\sum_{t=1}^4 W_{itj} \cdot Y_{i3} = 1 \quad (2.57)$$

$$\sum_{t=5}^7 W_{itj} \cdot Y_{i2} = 1 \quad (2.58)$$

$$0.85 \cdot VE_{ij} \leq V_{i31j} \leq 0.95 \cdot VE_{ij} \quad (2.59)$$

$$0.60 \cdot VE_{ij} \leq V_{i32j} \leq 0.70 \cdot VE_{ij} \quad (2.60)$$

$$0.60 \cdot VE_{ij} \leq V_{i33j} \leq 0.75 \cdot VE_{ij} \quad (2.61)$$

$$V_{i34j} = 0.95 \cdot VE_{ij} \quad (2.62)$$

$$V_{i25j} = 0.50 \cdot VE_{ij} \quad (2.63)$$

$$V_{i26j} = 0.45 \cdot VE_{ij} \quad (2.64)$$

$$V_{i27j} = 0.60 \cdot VE_{ij} \quad (2.65)$$

$$V_{iktj} \geq 0 \quad (2.66)$$

La función objetivo (ecuación 1.1) está diseñada para maximizar la ganancia monetaria neta presente generada por el volumen maderable (m^3) a cosechar y por el beneficio económico que implica la conservación del hábitat presente en el bosque, bajo los criterios de zonificación funcional TRIAD. El termino C_1 dentro de la función objetivo, refiere al beneficio económico que implica mantener determinada superficie bajo conservación y recuperación (ecuación 1.2) con un monto promedio de \$1,000.00/ha de acuerdo al apoyo ofrecido por el programa gubernamental “PRONAFOR” bajo el concepto servicios ambientales.

El termino C_2 , refiere a la ganancia obtenida por el volumen maderable de cada tipo de producto posible a obtener en el horizonte de planeación, con un precio por m^3 de \$1,452.00, para productos primarios (O_{1j}), \$833.00 para productos secundarios (O_{2j}), y \$433.00 para celulósicos y otros (O_{3j}); de acuerdo con Parra (2017).

Respecto al el termino C_3 , este implica una pérdida económica por no realizar la cosecha de forma dispersa en el bosque de producción; aumentando el riesgo de invasión al no tener presencia de actividades principalmente en las limítrofes compartidas con otras comunidades. Lo anterior es considerado determinante en la gestión forestal de la comunidad, dado que en la comunidad de San Pedro El Alto se han presentado problemáticas de invasión territorial y litigio. El criterio de operación del término C_3 restará en la función objetivo \$1,000.00 anuales cada vez que dos rodales designados para su aprovechamiento sean colindantes.

Debido a que los criterios óptimos para la clasificación de los rodales en cada tipo de zona de aprovechamiento no son determinantes, el término C_4 representa una sanción económica (\$1,000.00/ha) por cada rodal que sea asignado a una zona de aprovechamiento y que su potencial de uso no corresponda con los requisitos de la misma. Similarmente, el término C_5 implica una pérdida económica de \$2,000.00 por cada periodo dentro del horizonte de planeación que sobrepase los 150,000 m³ de volumen maderable a extraer, pues la comunidad ha establecido dicha cifra como el volumen máximo compatible con sus capacidades operativas y administrativas actuales.

El modelo matemático se encuentra acotado por 66 restricciones tanto operativas como de conservación de la biodiversidad demandadas por la comunidad de San Pedro El Alto. La ecuación (2.1) establece que la superficie correspondiente a la zona de conservación y recuperación deberá ser igual a la suma de las superficies seleccionadas por tipo de hábitat destinadas al mismo propósito (α_a). En caso de que la superficie de conservación y recuperación no iguale a la superficie deseable (Sdc) con la primera asignación de superficie por tipo de hábitat (Sc_a), la diferencia entre dichas superficies (ecuación 2.18 y ecuación 2.19) generará un déficit de conservación (DDC); el cual deberá completarse a través de una segunda selección de superficie por cada tipo de hábitat (ST_a) siempre y cuando exista aun superficie no integrada (ST_a) a la zona de conservación (ecuaciones 2.20-2.35). Por lo tanto, la superficie total de conservación y recuperación por tipo de hábitat será la suma de la superficie asignada en la primera y segunda etapa (ecuaciones 2.2-2.17).

La ecuación (2.36) indica que cada rodal solo puede ser asignado a una categoría de zonificación y ésta no cambiará dentro del horizonte de planeación. La ecuación (2.37) menciona que el volumen maderable a extraer por periodo dependerá del volumen extraído en función del tratamiento silvícola aplicado, siendo este calculado a través de la suma del volumen extraído de aquellos rodales sometidos a cada uno de los siete tipos de tratamientos (ecuaciones 2.38-2.44). Las ecuaciones (2.45-2.48) determinan que el volumen maderable extraído por rodal será únicamente contable si se respetan los tratamientos silvícolas correspondientes a la zona de aprovechamiento intensivo y similarmente las ecuaciones (2.49-2.51) contabilizarán el volumen extraído por rodal si se respetan los tratamientos silvícolas correspondientes a la zona de aprovechamiento extensivo.

Para calcular el volumen maderable necesario para obtener productos primarios en un periodo j , se suman los volúmenes extraídos por los tratamientos silvícolas: corta de liberación, corta de regeneración y tercera cosecha comercial, multiplicados por el porcentaje del producto posible a obtener (80%, 70% y 40%) respecto a un m^3 de madera (ecuación 2.52). Asimismo, el volumen maderable necesario para obtener productos secundarios en un periodo j , será igual a la suma de los volúmenes extraídos por los tratamientos silvícolas: corta de liberación, aclareo ligero, aclareo normal, corta de regeneración, primera cosecha comercial, segunda cosecha comercial y tercera cosecha comercial multiplicados por el porcentaje del producto posible a obtener (15%, 60% y 20%) en un m^3 de madera (ecuación 2.53).

Finalmente, para calcular el volumen maderable necesario para obtener productos celulósicos en un periodo j , se suman los volúmenes extraídos por los mismos tratamientos silvícolas definidos para productos secundarios, pero utilizando porcentajes de 5%, 40%, 10% y 15% por m^3 de madera (ecuación 2.54).

Para restringir la cantidad deseable de volumen maderable a obtener se define la ecuación (2.55), esta implica que se requiere extraer al menos 80 000 m^3 y no más de 150 000 m^3 . De igual manera, considerando la capacidad de procesamiento anual del aserradero de la comunidad, se define un abastecimiento de al menos 40 000 m^3 por periodo (ecuación 2.56)

y este volumen para aserrío estará conformado por el volumen maderable destinado únicamente a obtener productos primarios (O_{1j}) y secundarios (O_{1j}).

Para impedir que en un rodal se prescriba más de un tratamiento silvícola permitido en la zona de aprovechamiento extensivo se define la ecuación (2.57) y aplicando la misma restricción, pero para la zona de aprovechamiento intensivo se establece la ecuación (2.58). Tanto la ecuación (2.57) como la ecuación (2.58) impiden a su vez que el rodal sea intervenido más de una vez dentro del horizonte de planeación.

Para indicar los rangos permitidos de extracción respecto al volumen maderable existente (VE_{ij}) en el rodal para un periodo j , se especificó para cada tratamiento silvícola el rango permitido en la intensidad de corta, correspondiendo a: 85-95% en la corta de liberación, 60-70% en el aclareo comercial ligero, 60-73% en el aclareo comercial normal, 95% en la corta de regeneración; y 50%,45% y 60% para la primera, segunda y tercera cosecha comercial. Por último, el modelo incluye la restricción de no negatividad que implica obtener cifras de volumen maderable para extracción positivas o cero (ecuación 2.66).

2.5.2 Codificación de la instancia

La codificación de las soluciones candidatas al problema, concierne al proceso mediante el cual se asigna una estructura de datos a las variables del modelo matemático para que puedan ser operadas en el proceso de optimización (Suesca *et al.*, 2016). En este trabajo la codificación de las soluciones (Figura 2.6) se realizó en consideración de las variables de: conservación (α_a), zonificación (y_{ik}), anualidades de aprovechamiento (F_j), tratamientos silvícolas (X_{itj}), volumen maderable a extraer (V_{iktj}), factibilidad y valor de Z (VP).

El vector solución cuenta con 2,782 celdas que representan por sección de la solución, el valor asignado para cada uno de los 556 rodales. En las últimas dos celdas se especifica: el valor 1 o 0 que definen si la solución es factible o no factible y el valor de la función objetivo obtenido por dicha solución.

Todos los valores asignados por celda a cada rodal, son congruentes entre sí dentro del vector solución. Por ejemplo, para el rodal 1, si este es asignado a conservación, deberá contener en la primera celda de la sección de conservación y en la primera celda de la sección de zonificación el valor de 1; y en las primeras celdas de las secciones subsecuentes el valor de 0, pues al estar destinado a conservación no puede se puede definir: la anualidad de aprovechamiento, el tratamiento silvícola a aplicar y por ende el volumen a cosechar.

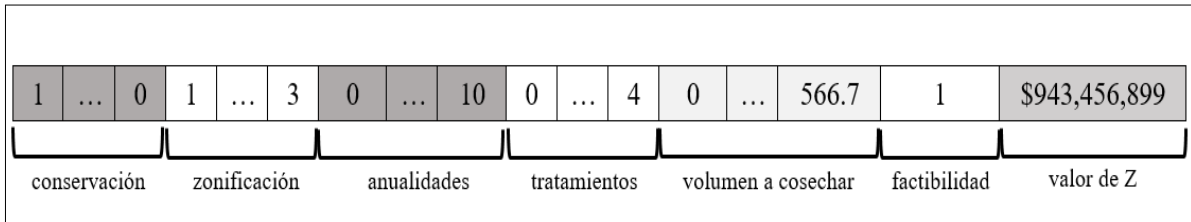


Figura 2.6 Codificación del vector solución para el modelo de optimización.

2.5.2.1 Operadores genéticos

La ejecución de los procesos de cruce, mutación y mejora utilizados por las técnicas GNS, GN2 y GN3 se restringieron a 3 secciones del vector solución, permitiendo únicamente realizar los posibles cambios en alguna de las 556 celdas correspondientes a: las variables de conservación, las variables de zonificación y las variables de volumen maderable a cosechar (Figura 2.7).

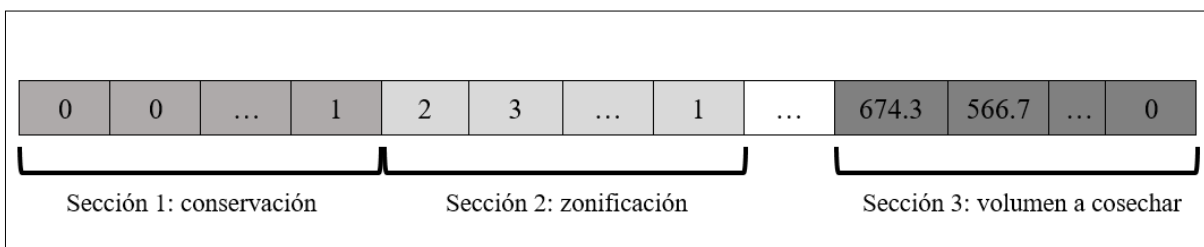


Figura 2.7 Secciones permitidas del vector solución para ejecutar los operadores genéticos.

2.5.2.2 Cruza

Como se mencionó anteriormente, la cruce entre padres se realizó en un solo punto seleccionado de forma aleatoria, y este indicó el punto de corte para la recombinación del material correspondiente a cada padre, por lo que de una sola cruce se generan dos individuos diferentes (hijos) con el material genético de ambos padres (Figura 2.8). Para evitar la no factibilidad en los individuos generados, mediante un proceso de reparación, se revisa que los nuevos individuos tengan una estructura coherente con la codificación inicial y que cumplan con las restricciones especificadas en el modelo.

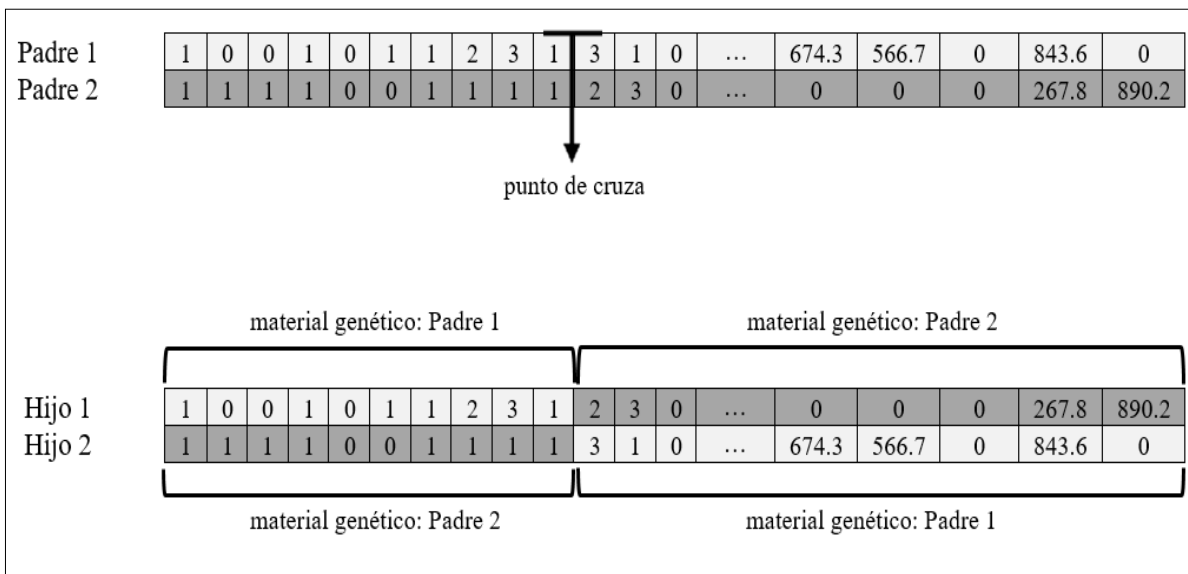


Figura 2.8 Proceso de cruce para generar nuevos individuos en la población.

2.5.2.3 Mutación

El operador de mutación utilizado para modificar la composición genética de algunos individuos con el fin de permitir la evolución de la población, se ejecutó de dos maneras diferentes. La primera versión de la mutación permite realizar una alteración aleatoria en el individuo, en donde es función de un valor de probabilidad, el cambio puede llevarse a cabo en una de las celdas de: conservación, zonificación o del volumen a cosechar (Figura 2.9).

El cambio de valor posible en para la sección de conservación es únicamente de 0 a 1 y viceversa (Figura 2.9, inciso a), mientras que para la sección de zonificación puede cambiar de 1 a 2, de 2 a 3 o de 3 a 1 (Figura 2.9, inciso b).

En cuanto al cambio del valor para la sección del volumen a cosechar, este solo es posible al elegir un nuevo porcentaje en la intensidad de corta, seleccionado del rango permitido por el tratamiento silvícola correspondiente a la celda (rodal) en donde se realizará el cambio (Figura 2.9, inciso c).

1	0	0	1	0	1	1	2	3	1	3	1	0	674.3	566.7	0	843.6	0
1	0	0	0	0	0	1	2	3	3	3	2	0	674.3	566.7	934.5	843.6	723.8
conservación					zona							volumen a cosechar					
1	0	0	1	0	1	1	2	3	1	3	1	0	674.3	566.7	0	843.6	0
1	0	0	1	0	1	1	2	2	1	2	2	0	674.3	213.4	0	422.1	723.8
conservación					zona							volumen a cosechar					
1	0	0	1	0	1	1	2	3	1	3	1	0	674.3	566.7	0	843.6	0
1	0	0	1	0	0	1	2	3	1	3	2	0	674.3	566.7	0	943.6	723.8
conservación					zona							volumen a cosechar					

Figura 2.9 Opciones de mutación en un solo punto.

Para la segunda versión de la mutación corresponde a una mutación en tres puntos, donde se manejó un valor de probabilidad para cada una de las secciones, permitiendo el cambio en una, dos o tres celdas; pero con la restricción de no ejecutar más de un cambio por sección (Figura 2.10). Los cambios posibles retoman los mismos valores que la primera versión de la mutación. La diferencia que presenta la mutación en tres puntos respecto a la mutación en un solo punto, es que puede existir una mutación simple (cambio del valor en una sola celda) (Figura 2.10, inciso d), una mutación doble (cambio en dos celdas) (Figura 2.10, inciso e) y mutación triple (cambio en tres celdas) (Figura 2.10, inciso f).

La razón de utilizar la segunda versión de la mutación, reside en poder intensificar el proceso de búsqueda y ayudar al algoritmo a garantizar que ningún punto en el espacio de búsqueda tenga una probabilidad cero de ser examinado. Como la mutación también genera modificaciones en los individuos, puede ocasionar la construcción de individuos no factibles, por lo que, en todas las técnicas que ejecutaron el proceso de mutación también se realizó la reparación de los individuos alterados.

1	0	0	1	0	1	1	2	3	1	3	1	0	674.3	566.7	0	843.6	0	d)
1	0	0	1	0	1	1	2	3	1	3	1	0	674.3	566.7	0	967.8	0	
conservación						zonificación						volumen a cosechar						
1	0	0	1	0	1	1	2	3	1	3	1	0	674.3	566.7	0	843.6	0	e)
1	0	0	1	0	1	1	2	2	1	3	1	0	674.3	213.4	0	843.6	0	
conservación						zonificación						volumen a cosechar						
1	0	0	I	0	1	1	2	3	I	2	1	0	674.3	566.7	0	343.6	0	f)
1	0	0	0	0	0	1	2	2	3	3	2	0	674.3	566.7	811.7	983.6	723.8	
conservación						zonificación						volumen a cosechar						

Figura 2.10 Opciones de mutación en tres puntos.

2.5.2.4 Función de mejora

El proceso de mejora utilizado en la técnica GN3, impide que las nuevas generaciones se conformen únicamente de los individuos generados con los operadores genéticos. En cada generación se considera una población total conformada tanto la población inicial (población de la que provienen los padres) y la población creada que incluye a los hijos producto de la cruce y mutación.

Para conformar la nueva población, se utilizan dos criterios de selección. El primer criterio (C1) considera seleccionar un determinado número de individuos seleccionados al azar provenientes de la población inicial, mientras que el segundo criterio (C2) retoma la población creada y evaluando el valor de la función objetivo obtenido por cada individuo, selecciona la misma cantidad de individuos seleccionados en C1 que presenten el mejor valor de Z (Figura 2.11).

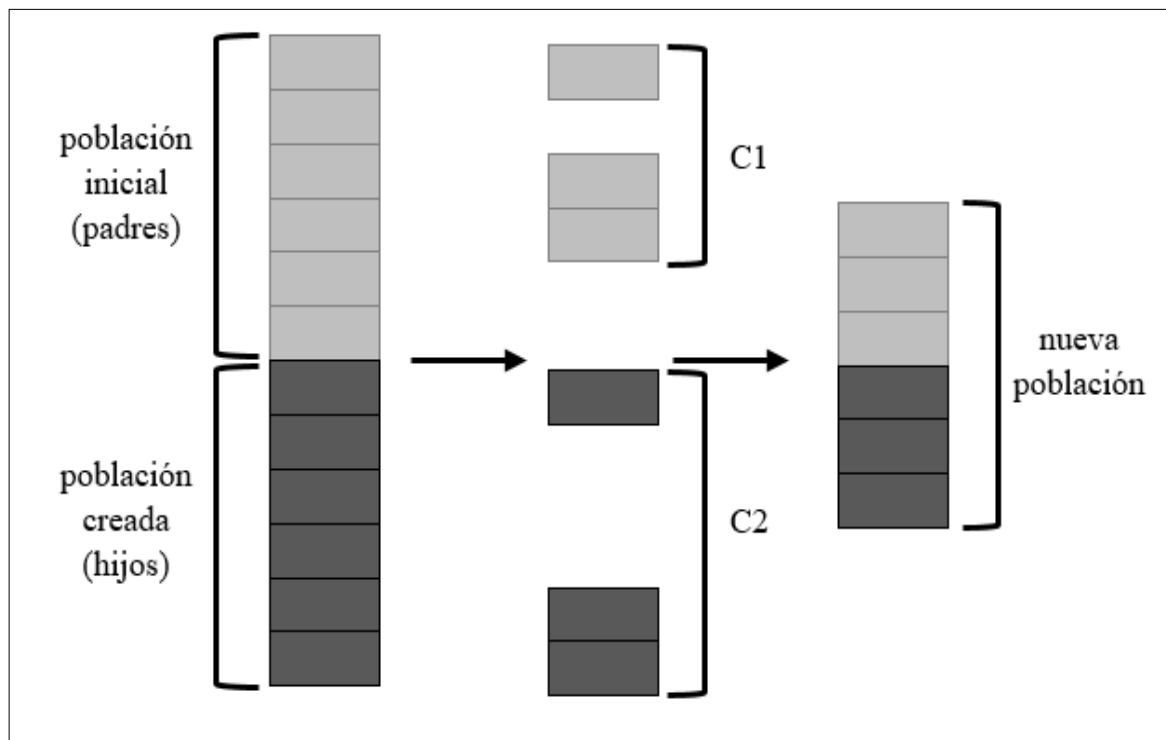


Figura 2.11 Proceso de selección para conformar la nueva población.

Este criterio de mejora permite mejorar la evolución de la población, al mantener la calidad de las soluciones al escoger aquellos que maximicen la función objetivo. Además, agrega diversidad en las soluciones obtenidas, permitiendo que un porcentaje de los individuos pasen a la siguiente generación sin sufrir modificaciones en todo el proceso del algoritmo.

2.6 Conclusiones

La instancia definida para resolver el problema de zonificación forestal bajo el enfoque TRIAD en San Pedro El Alto expone un modelo complejo de planificación que busca maximizar el beneficio económico que se obtiene a través del aprovechamiento de los recursos forestales. Debido a que la instancia cuenta con gran número de variables y restricciones, además de funciones de tipo no lineal, difícilmente puede resolverse con métodos exactos en un tiempo razonable. Por lo tanto, las técnicas heurísticas y metaheurísticas planteadas cuentan con un alto potencial para encontrar una solución aceptable al problema definido a un bajo costo computacional. Si bien las técnicas heurísticas como la búsqueda local múltiple o la técnica de multiarranque son capaces de obtener una solución cercana al óptimo de forma sencilla, las técnicas metaheurísticas como el recocido simulado y los algoritmos genéticos permiten mejorar los procedimientos de búsqueda de soluciones y así reducir el tiempo de ejecución. Sin embargo, combinar técnicas heurísticas con metaheurísticas es altamente recomendable para incrementar la eficiencia del método de solución y aumentar la robustez (baja probabilidad de obtener una solución no deseable) de los resultados.

2.7 Literatura citada

- Alancay, N., S. Villagra and A. Villagra. 2016. Algoritmos metaheurísticos trayectoriales para optimizar problemas combinatorios. *Informes-Científicos UNPA* 8: 56-75.
- Bachmatiuk, J., J. Garcia G. and J.G. Borges. 2015. Analysis of the performance of different implementation of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling. *Silva Fennica* 49: 1-18.
- Badr, G., M. Hosny, N. Bintayyash, E. Albilali, and M.S. Larabi S. 2016. BeamGA median: a hybrid heuristic search framework. *In: Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion. Association for Computing Machinery. 20-24 de Julio. Colorado, Estados Unidos. pp: 1455-1456.*
- Bento, G.C., O. Pereira F., A. Soubeyran and V.L. de Sousa J. 2018. Inexact multi-objective local Search proximal algorithms: application to group dynamic and distributive justice problems. *Journal of Optimization Theory and Applications* 177: 181-200.

- Bettinger, P., D. Graetz, K. Boston, J. Sessions and W. Chung. 2002. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica* 36: 561–584.
- Bettinger, P., K. Boston, J.P. Siry and D.L. Grebner. 2009. *Forest management and planning*. Academic Press, New York. pp: 172-178.
- Bettinger, P., K. Boston, J.P. Siry and D.L. Grebner. 2017. *Forest management and planning*. 2da edición. Academic Press, New York. pp: 1-20.
- Borges, P., T. Eid and E. Bergseng. 2014. Applying simulated annealing using different methods for the neighborhood search in forest planning problems. *European Journal of Operational Research* 233: 700-710.
- Boston, K. and P. Bettinger. 2002. Combining tabu search and genetic algorithm heuristic techniques to solve spatial harvest scheduling problems. *Forest Science* 48: 35-46.
- Buongiorno, J. and J.K. Gilles. 2003. *Decision methods for forest resource management*. Academic Press, Wisconsin. pp: 9-27.
- Casado, S. y R. Martí. 2007. Principios de la búsqueda dispersa. *Recta* 3: 97-116.
- Chen, B.W. and Gadaw, K.V. 2008. Optimisation of spatial objectives in planning for sustainable forest medium-term management of Norway Spruce from northern Germany. *Forest Research* 21: 279-288.
- Coello C., C.A., G.B. Lamont and D.A. Van Veldhuizen. 2007. Basic concepts. *In*: Goldberg, D.E. y J. R. Koza (eds.). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. 2da edición. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts. pp: 1-19.
- Crowe, K. A. and J. D. Nelson. 2005. An evaluation of the simulated annealing algorithm for solving the area-restricted harvest-scheduling model against optimal benchmarks. *Canadian Journal of Forest Research* 35: 2500-2509.
- Cruz C., M.A. and O. Díaz P. 2009. Un mecanismo de vecindad con búsqueda local y algoritmo genético para el problema de transporte con ventanas de tiempo. *Programación Matemática y Software* 1: 91-109.
- de Michelli, M. 2009. Algoritmo de búsqueda local iterativa para la programación de piezas en un sistema flowshop híbrido. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Cataluña España. 83 p.

- Dong, L., P. Bettinger, Z. Liu and H. Qin. 2015a. Spatial forest harvest scheduling for areas involving carbon and timber management goals. *Forests* 6: 1362-1379.
- Dong, L., P. Bettinger, Z. Liu and H. Qin. 2015b. A comparison of a neighborhood search technique for forest spatial harvest scheduling problems: a case study of the simulated annealing algorithm. *Forest Ecology and Management* 356: 124-135.
- Ducheyne, E.I., R.R. de Wulf and B. de Baets. 2004. Single versus multiple objective genetic algorithms for solving the even-flow forest management problem. *Forest Ecology and Management* 201: 259-273.
- Falcão, A.O. and J.G. Borges. 2001. Designing an evolution program for solving integer forest management scheduling models: an application in Portugal. *Forest Science* 47: 158 – 168.
- Felton, A., T. Ranius, J.M. Roberge, K. Öhman, T. Lämås, J. Hynynen, A. Juutinen, M. Mönkkönen, U. Nilsson, T. Lundmark and A. Nordin. 2017. Projecting biodiversity and Wood production in future forest landscapes: 15 key modelling considerations. *Journal of Environmental Management* 197: 404-414.
- Ferrero O., V. y F.M. Mas. 2005. Un modelo basado en algoritmos genéticos para planificación forestal y optimización de cortas. *In: IV Congreso Forestal Español*. 26-30 de septiembre 2005. Zaragoza, España. pp: 1-6.
- García M., C., F.J. Rodríguez and M. Lozano. 2017. Genetic algorithms. *In: Martí, R., P. Pardalos y M.G.C. Resende (eds.). Multi-start methods*. Springer, Berlin. pp: 2-28.
- Glover, F., M. Laguna y Rafael Martí. 2000. Fundamentals of Scatter Search and path relinking. *Control and Cybernetics* 29: 654-684.
- Hedar, A.R. and M. Fukushima. 2006. Tabu Search directed by direct Search methods for nonlinear global optimization. *European Journal of Operational Research* 170: 329-349.
- Hernandez, M., T. Gómez, J. Molina, M.A. León and R. Caballero. 2014. Efficiency in forest management: a multiobjective harvest scheduling model. *Journal of Forest Economics* 20: 236-251.
- Hifi, M., R. M'Hallah and T. Saadi. 2008. Algorithms for the constrained two-staged two-dimensional cutting problem. *Inform Journal on Computing* 20: 212-221.

- Hoganson, H.M. and N.G. Meyer. 2015. Constrained optimization for addressing forest-wide timber production. *Canadian Journal of Forest Research* 1:33-43.
- Jian, B. and W.K. Chan. 2017. Input-based adaptive randomized test case prioritization: a local beam Search approach. *The Journal of Systems and Software* 105: 91-106.
- Kaya, A., P. Bettinger, K. Boston, R. Akbulut, Z. Ucar, J. Siry, K. Merry and C. Ciezzewski. 2016. Optimization in forest management. *Current Forestry Reports* 2: 1-17.
- Kesilmiş, Z. and M.A. Karabacak. 2017. Comparative study of maximum power point tracking algorithms under partial shading conditions. *Istanbul University-Journal of Electrical & Electronics Engineering* 17: 335-3341.
- Kong, J., M. Rönnqvist and M. Frisk. 2012. Modeling an integrated market for sawlogs, pulpwood, and forest bioenergy. *Canadian Journal of Forest Research* 42: 315–332.
- Kuloglu, T.Z. 2014. Development of a genetic algorithm model for a multiple-objective forest harvesting and zonation problem. Master Thesis. University of Alberta. Canada. 135 p.
- Liu, G., S. Han, X. Zhao, J. D. Nelson, H. Wang and W. Wang. 2006. Optimisation algorithms for spatially constrained forest planning. *Ecological Modelling* 194: 421-428.
- López S., A.D., A.G. Hernández D., D. Vigo, R. Caballero and J. Molina. 2014. A multi-start algorithm for a balanced real-world open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research* 238: 104-113.
- Makrymanolakis, N., M. Marinaki and Y. Marinakis. 2016. Data mining parameters' selection procedure applied to a multi-start local search algorithm for the permutation flow shop scheduling problem. *In: Symposium Series on Computational Intelligence*. 6-9 de diciembre. Atenas, Grecia. pp: 1-8.
- Mao, C., I. Xiao, X. Yu and J. Chen. 2015. Adapting ant colony optimization to generate test data for software structural testing. *Swarm and Evolutionary Computation* 20: 23-36.
- Martí C., R. 2003. Calidad de los algoritmos. *In: Martí C., R. (ed.). Algoritmos heurísticos en optimización combinatoria*. Universidad de Valencia, Valencia. pp: 1-4.
- Martí, R. y J.M. Moreno V. 2003. Métodos multiarranque. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 7: 49-60.

- Martí R., J.A. Lozano, A. Mendiburu and L. Hernando. 2017. Multi-start methods. *In: Martí, R., P. Panos and M. Resende. Handbook of Heuristics. Springer International Publishing, Switzerland. pp: 2-20.*
- Melián, B., J.A. Moreno P y M. Moreno V. 2003. Metaheurísticas una visión global. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial 7: 7-28.*
- Michallet, J., C. Prins, L. Amodeo, F. Yalaoui and G. Vitry. 2014. Multi-start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. *Computers and Operations Research 41: 196-207.*
- Montes O., E. 2017. Metaheurísticas para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRP-TW). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 111 p.
- Moore, C.T., M.J. Conroy and K. Boston. 2000. Forest management decisions for wildlife objectives: system resolution and optimality. *Computers and Electronics in Agriculture 27: 25-39.*
- Ohsaki, M. and M. Yamakawa. 2018. Stopping rule of multi-start local Search for structural optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization 57: 595-603.*
- Öztürk, M.M. 2017. Adapting code maintainability to bat-inspired test case prioritization. *In: International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications. 3-5 de Julio. Gdynia, Polonia. pp: 1-6.*
- Parra P., J.P. 2017. Crecimiento y evaluación financiera para plantaciones de *Pinus patula* Schiede. *ex Schltdl. et Cham.* en Zacualpan, Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. México. 127 p.
- Pasquale, S. 2017. Parallel genetic algorithm in the cloud. Tesis Doctoral. Universidad de Salerno. Italia. 150 p.
- Pinninghoff, M.A., R. Contreras and C. Pantoja. 2014. A comparison of methods for the vehicle routing problem. *In: XL Latin American Computing Conference. 15-19 de Septiembre. Montevideo, Uruguay. pp: 1-8.*
- Prüngel-Bennett, A. 2004. When a genetic algorithm outperforms hill-climbing. *Theoretical Computer Science 320: 135-153.*
- Pukkala, T. and M. Kurttila. 2005. Examining the performance of six heuristic search techniques in different forest planning problems. *Silva Fennica 39: 67-80.*

- Pukkala, T. and T. Heinonen. 2006. Optimizing Heuristic Search in forest planning. *Nonlinear Analysis: Real World Applications* 7: 1248-1297.
- Quintero M., A. 2009. Métodos heurísticos para la planificación y el manejo forestal. Tesis Doctoral. Universidad de Los Andes. Colombia. 78 p.
- Quintero M., M.A., M. Jerez R. y M. Ablan. 2010. Métodos heurísticos en la planificación del manejo forestal: un ejemplo de aplicación. *Revista Forestal Venezolana* 54: 183-194.
- Rodrigues, F. L., H.G. Leite, H.N. Santos, A.L de Souza y G.F. Silva. 2004. Metaheurística simulated annealing para solução de problemas de planejamento florestal com restrições de integridade. *Árvore* 28: 247-256.
- Sessions, J. P. Bettinger and G. Murphy. 2007. Heuristics in forest planning. *In: Weintraub, A., C. Romero, T. Bjørndal, R. Epstein y J. Miranda (eds.). Handbook of operations research in natural resources, International Series in Operations Research & Management Science. Kluwer Academic Publishers, New York. pp: 431-448.*
- Sörensen, K. 2015. Metaheuristics-the metaphor exposed. *International Transactions in Operational Research* 22:3-18.
- Suesca M., E., M. Bermúdez C., C. Mejia M., L.A. Cobo C. y L. Rodríguez U. 2016. Diseño de celdas de manufactura considerando el balanceo de las cargas de trabajo con algoritmos genéticos. *Revista ONTARE* 4: 89-122.
- Torres S., M.D., A. Torres S., J.R. de la Torre S., E.E. Ponce de León S. y F.J. Luna R. 2008. Estudio comparativo de algoritmos de búsqueda local. *In: Séptima Conferencia Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática. Florida, Estados Unidos. 29 de junio-2 de julio. pp: 1-6.*
- Ugray, Z., L. Lasdon, J.C. Plummer, F. Glover, J. Kelly and R. Martí. 2005. A multistart scatter search heuristic for smooth NLP and MINLP problems. *In: Rego, C. y B. Alidaee. Metaheuristic optimization via memory and evolution. Kluwer Academic Publishers, USA. pp: 25-58.*
- Vélez G., M.C., C.A. Castro Z. y J. Maya T. 2003. Algoritmo de búsqueda aleatoria para la programación de la producción en un taller de fabricación. *Revista Universidad EAFIT* 39: 76-86.

- Vélez, M.C. y J.A. Montoya. 2007. Metaheurísticos: una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones. *Revista EIA* 1: 99-115.
- Vergara, F. P., C.D. Palma and H. Sepúlveda. 2015. A comparison of optimisation models for lumber production planning. *Bosque* 36: 239-246.
- Verhoeven, M.G.A. and E.H.L. Aarts. 1995. Parallel local search. *Journal of Heuristics* 1: 43-65.
- Walliser, M.A. 2012. Fort Stewart shortest path analysis of debris cleanup options. Tesis de Maestría. Universidad de Georgia. Estados Unidos. 68 p.
- Weeks, E.S., N. Mason, A.G. Ausseil and A. Herzig. 2014. Prioritising land-use decision for the optimal delivery of ecosystem services and biodiversity protection in productive landscapes. *In: Grillo, O. (ed.). Biodiversity-the dynamic balance of the planet. InTech, Croacia. pp: 1-32.*

CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE NUEVE HEURÍSTICAS PARA LA RESOLUCIÓN DEL MODELO DE ZONIFICACIÓN FUNCIONAL DEL BOSQUE DE SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA.

3.1 Resumen

La planificación del manejo forestal requiere programar a detalle actividades en espacio y tiempo que permitan alcanzar objetivos económicos, ambientales y sociales. Las limitaciones computacionales que presentan los métodos exactos para resolver este tipo de problemas motivan a los administradores forestales a desarrollar métodos que permitan satisfacer demandas multiobjetivo o multipropósito dentro de un bosque. Las técnicas heurísticas se han diseñado para encontrar soluciones sub-óptimas que definan como asignar esfuerzos y recursos a estos problemas de optimización cuando el tiempo es un recurso limitado o el costo de encontrar la solución óptima es elevado. Estas técnicas se han utilizado ampliamente en el campo forestal y en los últimos años se han diseñado variaciones y combinaciones de técnicas que han permitido mejorar el desempeño de estos métodos para determinar programas de cosecha, maximizar beneficios económicos, conservar la biodiversidad, etc. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la resolución de la instancia descrita en el Capítulo 3. Se utilizaron nueve técnicas heurísticas para el propósito. Primero se describen los resultados obtenidos por cada una de las técnicas heurísticas y metaheurísticas utilizadas, en términos de volumen anual de cosecha, tipos de productos a obtener y criterios de zonificación. Posteriormente, las nueve técnicas son comparadas en relación a su desempeño computacional para resolver el problema, en el valor del beneficio económico proyectado, y su aproximación al escenario de planificación definido en el plan de manejo forestal actual en la comunidad de San Pedro El Alto. La técnica de recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS) obtuvo el mejor escenario de aprovechamiento, maximizando el valor presente (VP) obtenido del volumen cosechado, acorde con las definiciones de la zonificación TRIAD.

Palabras clave: valor presente, recocido simulado, búsqueda local simple, zonificación TRIAD.

APPLICATION OF NINE HEURISTIC TECHNIQUES TO RESOLVE THE FUNCTIONAL ZONING MODEL IN THE FOREST OF SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA.

3.2 Abstract

The current planning problems in forest management require the programming of detailed spatial and temporal activities that allow achieving economic, environmental and social objectives. The computational limitations presented by exact methods to solve this type of problems motivate forest managers to develop alternative ways of optimization that allow satisfying multiobjective or multipurpose demands within a forest. Heuristic techniques have been designed to find sub-optimal solutions that define how to allocate efforts and resources to satisfy specific objectives of a problem when the time is a limited resource, or the cost of finding the optimal solution is high. These techniques have been widely used in the forestry field, and in recent years, different variations and combinations of techniques have been designed that have allowed improving the performance of these methods to determine harvests scheduling, maximize economic benefits, conserve biodiversity, etc. This chapter presents the results obtained by the nine heuristic techniques used to solve the instance described in Chapter 3. First, the results obtained by each of the heuristic and metaheuristic techniques used are described, regarding annual harvest volume, types of products obtained and zoning criteria. Later, the heuristics are compared through their computing performance to solve the problem and to maximize the economic benefit, as well as to obtain a comparable scenario with the current forest management plan in the community of San Pedro El Alto. The technique of simulated annealing with simple local search (RBLS) estimated the best harvest scenario that allows maximizing the present value (VP) according to the definitions of the TRIAD zoning.

Key words: net present value, simulated annealing, simple local search, TRIAD zoning.

3.3 Introducción

3.3.1 Heurísticos en la gestión forestal

La planificación del manejo forestal requiere tomar decisiones en diferentes niveles jerárquicos, de manera descendente: estratégico, táctico y operacional. Este enfoque debe considerar la distribución eficiente de recursos para mantener un flujo de manera constante, obtener el máximo rendimiento económico y mejorar los aspectos ecológicos y sociales (Acuna, 2017; Araújo *et al.*, 2017), lo que resulta en un problema complejo y difícil de resolver.

En general, la planificación forestal involucra un gran número de variables de decisión y restricciones, además de objetivos espaciales; y requiere de herramientas que permitan clasificar, de forma rápida y sencilla, las estrategias de gestión alternativas disponibles como soluciones al problema planteado (Lawrence y Stewart, 2011; Augustynczyk *et al.*, 2016; Yoshimoto *et al.*, 2016).

Las técnicas de optimización son herramientas utilizadas para determinar la asignación eficiente de recursos limitados que permitan satisfacer los objetivos establecidos en la planificación forestal. Se han desarrollado diversos métodos matemáticos que pueden catalogarse en dos enfoques principales: metodologías exactas y heurísticas. Los procedimientos heurísticos no garantizan que se obtenga una solución óptima, pero permiten encontrar soluciones sub-óptimas a un problema cuando el tiempo es un recurso limitado o el costo de encontrar la solución óptima es alto (Bettinger *et al.*, 2015; Nobre *et al.*, 2016; Akbulut *et al.*, 2017). Los únicos requisitos de la heurística son que la variable de decisión sea numérica y que exista un método para calcular su valor (Jin *et al.*, 2016).

Las técnicas heurísticas se han utilizado ampliamente en el ámbito del manejo forestal debido a su gran capacidad para abordar problemas complejos y de gran tamaño. El primer algoritmo de este tipo fue desarrollado por Bullard *et al.* en 1985, quienes diseñaron un algoritmo de búsqueda aleatoria para estimar simultáneamente el aclareo óptimo y la edad de cosecha final de un bosque. De acuerdo con Nobre *et al.* (2016) y Yoshimoto y Asante (2018), en los últimos 5 años se han implementado diversas técnicas heurísticas, tanto originales como

híbridas (alrededor de 30 a nivel mundial), para resolver problemas de planificación forestal, abordando problemas tanto de tipo “exógeno”, los cuales no incluyen información espacial en su proceso de optimización, como de tipo “endógeno”, que pueden emplear variables de decisión que describen la estructura espacial del paisaje forestal (Dong *et al.*, 2018).

Dentro de las técnicas más destacadas se encuentran la búsqueda tabú aplicada inicialmente por Murray y Church (1995), Bettinger *et al.* (1997) y Boston y Bettinger (1999); los algoritmos genéticos empleados en investigaciones preliminares de Lu y Eriksson (2000) y Falcao y Borges (2002); y el recocido simulado, que es el método más citado en la literatura, utilizado originalmente por Dahlin y Sallnäs (1993), Lockwood y Moore (1993) y Öhman (2000) (Zeng *et al.*, 2007; Araújo *et al.*, 2017; Yao *et al.*, 2017). Aunque las heurísticas son generalmente simples de construir y parten de un concepto general de la técnica original, deben ser modificadas para adaptarse a cada problema de planificación.

A continuación, se describen los resultados obtenidos por los nueve métodos heurísticos adaptados para la resolución del modelo de optimización planteado en el Capítulo 2, los cuales fueron descritos en el Capítulo 3 y corresponden a: un algoritmo de búsqueda local simple (BLS), un algoritmo de búsqueda local múltiple (BLM), un algoritmo de multiarranque (MTA), un algoritmo de recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS), un algoritmo de recocido simulado con búsqueda local múltiple (RBLM), un algoritmo de recocido simulado con multiarranque (RMTA), un algoritmo de genético simple (GNS), un algoritmo genético de mutación múltiple (GN2) y un algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo (GN3).

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Implementación de técnicas heurísticas y metaheurísticas

La codificación de las soluciones fue estructurada con dos restricciones genéricas básicas: 1) un subconjunto de las restricciones debe cumplirse de manera automática, y 2) el vector solución asegura que un rodal se asigna, durante el periodo de planificación, solo a un tipo de zona, solo a una intervención silvícola, y solo a un tratamiento silvícola.

Para la generación de una solución vecina se definieron secciones del vector solución en los que un valor puede ser modificado dentro del rango específico. A partir de una solución inicial (x), para generar una solución vecina (x'), puede modificarse la sección “zona” con la posibilidad de asignar valores enteros entre 1 y 3, la sección “periodos” con valores enteros entre 1 y 10, la sección “tratamientos” con valores enteros entre 1 y 7, y la sección “cosecha” con valores continuos positivos que describen el volumen posible a cosechar del rodal acorde con el tratamiento silvícola prescrito (Figura 3.1).

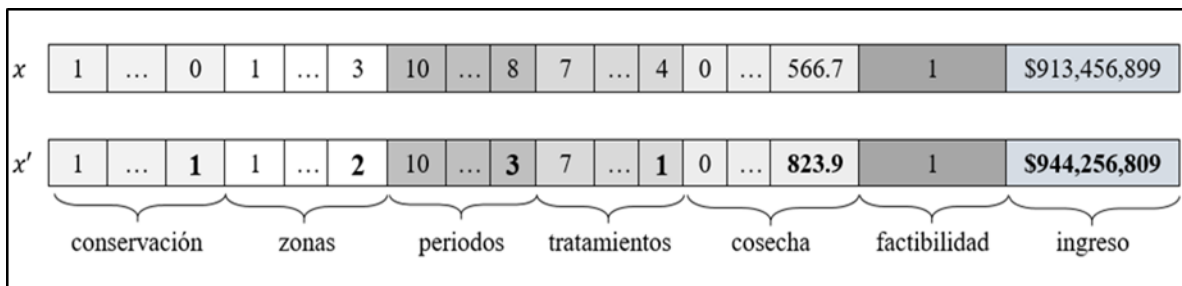


Figura 3.1 Ejemplo de codificación de la solución inicial y de una solución vecina.

Cada algoritmo se codificó en el lenguaje de programación MATLAB[®] versión R2015a⁴ y se ejecutó 20 veces, realizando 18 100 evaluaciones a la función objetivo por cada ejecución. Con dicho valor, la obtención de soluciones de buena calidad en un tiempo de cómputo razonable fue consistente, y este se determinó empíricamente a través de pruebas experimentales. Para el propósito se utilizó un ordenador con microprocesador Intel Celeron 1.60 GHz y una memoria RAM de 8 GB. A continuación, se presentan los pseudocódigos (Figura 4.2-4.10) de las técnicas heurísticas desarrolladas para la resolución del modelo de la instancia (escenario real y cuantificable) definida en el Capítulo 3 para resolver el problema de optimización definido.

⁴ MATLAB and Statistics Toolbox Release 2015a. The MathWorks, Natick, Massachusetts, United States.

3.4.1.1 Búsqueda local simple (BLS)

```
for  $q = 1:192$ 
  Generar una solución factible aleatoria  $S_i$ 
end
Mejor solución = mejor solución inicial  $S_i$ 
Calcular el valor de la función objetivo de la solución inicial  $f(S_i)$ 
  Mientras  $k < 1628$ 
    Generar 1 vecino ( $S_w$ ) de la solución inicial
    Calcular el valor de la función objetivo ( $f(S_w)$ ) de la solución vecina
    Generar 10 vecinos ( $S_n$ ) de la solución  $S_w$ 
    Calcular el valor de la función objetivo ( $f(S_n)$ ) para cada uno de los 10 vecinos
    Seleccionar mejor vecino (de los 10 generados) =  $S_v$ 
    Si  $f(S_w) < f(S_v)$ 
      Solución previa ( $S_p$ ) =  $S_v$ 
      de lo contrario  $S_p = S_w$ 
    Si  $f(S_p) < f(S_i)$ 
      Solución actual ( $S_a$ ) =  $S_i$ 
      de lo contrario  $S_a = S_p$ 
     $k = k + 1$ 
  Mejor individuo encontrado ( $S_a$ ) = mejor solución encontrada
```

Figura 3.2 Pseudocódigo del algoritmo de búsqueda local simple.

3.4.1.2 Búsqueda local múltiple (BLM)

```
for  $q = 1:100$ 
  Generar una solución factible aleatoria  $S_i$ 
end
Población inicial ( $A = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i10}\}$ ) = 10 mejores soluciones seleccionadas de las 100 generadas
Calcular del valor de aptitud para todos los individuos que conforman a  $A$ 
  Mientras  $k < 120$ 
    Para cada  $S_i$  perteneciente a la población inicial:
      Generar 15 vecinos ( $S_u$ )
      Calcular el valor de aptitud de cada  $S_u$ 
      Seleccionar mejor vecino (de los 15 generados) =  $S_v$ 
      Si  $f(S_i) < f(S_v)$ 
        Actualizar  $S_i = S_v$ , de lo contrario  $S_i = S_i$ 
      Nueva población ( $NP$ ) = soluciones  $S_i$  actualizadas
      Población inicial ( $A$ ) =  $NP$ 
     $k = k + 1$ 
  Mejor individuo encontrado ( $S_a$ ) = mejor solución de la población inicial
```

Figura 3.3 Pseudocódigo del algoritmo de búsqueda local múltiple.

3.4.1.3 Multiarranque (MTA)

```
for  $q = 1:100$ 
  Generar una solución factible aleatoria  $S_i$ 
end
Mejor solución conocida ( $S_b$ ) = mejor solución factible aleatoria
Calcular el valor de la función objetivo de la mejor solución conocida  $f(S_b)$ 

Mientras  $k < 40$ 
   $k = k + 1$ 
  for  $p = 1:100$ 
    Generar una solución factible aleatoria  $S_i$ 
    end
    Solución inicial ( $S_i$ ) = mejor solución factible encontrada
    Calcular el valor de la función objetivo de la solución inicial  $f(S_i)$ 
    Mientras  $j < 35$ 
       $j = j + 1$ 
      Generar 1 vecino ( $S_n$ ) de la solución inicial
      Calcular el valor de la función objetivo  $f(S_n)$  de la solución vecina
      Solución alterada = solución  $S_n$ 
      for  $q = 1:9$ 
        Generar 1 vecino ( $S_w$ ) de la solución alterada
        end
        Seleccionar mejor vecino ( $S_v$ ) = mejor vecino encontrado
        Calcular el valor de la función objetivo del mejor vecino  $f(S_v)$ 
        Si  $f(S_n) < f(S_v)$ 
          Solución actual ( $S_a$ ) =  $S_v$ 
          de lo contrario  $S_a = S_n$ 
        Si  $f(S_a) < f(S_i)$ 
          Solución actual ( $S_a$ ) =  $S_i$ 
          de lo contrario  $S_a = S_a$ 
        end
      Si  $f(S_a) < f(S_b)$ 
        Solución actual ( $S_a$ ) =  $S_v$ 
        de lo contrario  $S_a = S_a$ 
      Mejor solución encontrada =  $S_a$ 
```

Figura 3.4 Pseudocódigo del algoritmo de multiarranque.

3.4.1.4 Recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS)

Definir:

T° inicial = 850

T° final = 0.1

Tasa de disminución de la T° (α) = 0.9

for $q = 1:100$

 Generar una solución factible aleatoria S_i

end

Solución inicial (S_i) = mejor solución factible aleatoria

Calcular el valor de la función objetivo de la solución inicial $f(S_i)$

Mientras $T^\circ > T^\circ$ final

 for $p = 1:19$

 Generar una solución vecina S_v de la solución actual

 Calcular el valor de la función objetivo de la solución vecina $f(S_v)$

 Primer vecino = S_v

 for $j = 1:10$

 Generar una solución vecina S_b del primer vecino

 end

 Seleccionar:

 Mejor vecino (S_b) = mejor vecino encontrado

 Calcular el valor de la función objetivo de la solución vecina $f(S_b)$

 Si $f(S_v) < f(S_b)$

 Solución actual (S_a) = S_b

 de lo contrario $S_a = S_v$

 Calcular $\Delta E = f(S_a) - f(S_i)$

 Si $\Delta E < 0$

 Actualizar $S_a = S_i$

 Si $\Delta E \geq 0$

 Actualizar $S_a = S_i$ con una probabilidad $P(\Delta E)$

 end

$T^\circ = \alpha \cdot T^\circ$

end

Mejor solución obtenida = S_a

Figura 3.5 Pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado con búsqueda local simple.

3.4.1.5 Recocido simulado con búsqueda local múltiple (RBLM)

```

Definir:

T° inicial = 10
T° final = 0.1
Tasa de disminución de la T° ( $\alpha$ ) = 0.9

for  $q = 1:64$ 
  Generar una solución aleatoria  $S_i$  y calcular su valor de la función objetivo  $f(S_i)$ 
end
Población inicial ( $A$ ) =  $\{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i64}\}$ 
Mejor población inicial ( $B$ ) = mejores 8 soluciones iniciales aleatorias
Población secundaria ( $B'$ ) = Mejor población inicial ( $B$ ) con soluciones ( $S_p$ )
Mientras  $T^\circ > T^\circ$  final
  for  $p = 1:7$ 
    for  $j = 8$ 
      for  $n = 7$ 
        Generar una solución vecina  $S_v$  para cada solución inicial de la población  $B$ 
        Calcular su valor de la función objetivo  $f(S_v)$ 
      end
      Población de vecinos ( $C$ ) =  $\{S_{v1}, S_{v2}, \dots, S_{v56}\}$ 
      Mejor población de vecinos ( $D$ ) = mejores 8 soluciones vecinas
      Población ( $X$ ) = unión de las poblaciones  $B$  y  $D$ 
      Población ( $NP$ ) = mejores 8 soluciones de la población  $X$ 
      Población ( $Z$ ) = soluciones restantes de la población  $X$ 
    end
    for  $k = 1:8$ 
      for  $h = 1:8$ 
        Comparar uno a uno las soluciones de las poblaciones  $NP$  y  $Z$ 
        Seleccionar la mejor solución factible ( $S_{ivh}$ )
      end
      Nueva ( $NP'$ ) = mejores soluciones factibles ( $S_{ivh}$ )
    end
    Para cada individuo de las poblaciones ( $NP'$ ) y ( $B'$ ):
      Calcular  $\Delta E = f(S_{ivh}) - f(S_p)$ 
      Si  $\Delta E < 0$  Actualizar  $S_{ivh} = S_p$ 
      Si  $\Delta E \geq 0$  Actualizar  $S_{ivh} = S_p$  con una probabilidad  $P(\Delta E)$ 
    end
  end
   $T^\circ = \alpha \cdot T^\circ$ 
end
Mejor solución obtenida ( $S_{ivh}$ ) = mejor solución de la población ( $NP'$ )

```

Figura 3.6 Pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado con búsqueda local múltiple.

3.4.1.6 Recocido simulado con multiarreglo (RMTA)

```

Definir:
T° inicial = 10
T° final = 0.1
Tasa de disminución de la T° ( $\alpha$ ) = 0.9
for  $p = 1:3$ 
  for  $k = 1:10$ 
    Generar una solución aleatoria  $S_i$  y calcular su valor de la función objetivo  $f(S_i)$ 
  end
  Mejor solución obtenida ( $S_b$ ) = mejor solución encontrada  $S_i$  ;
  Solución alterna ( $S_{b'}$ ) =  $S_b$ 
  Mientras  $T^\circ > T^\circ$  final
    for  $n = 1:3$ 
      for  $m = 1:5$ 
        Generar una solución aleatoria  $S_j$  y calcular su valor de la función objetivo  $f(S_j)$ 
      end
      Mejor solución obtenida ( $S_g$ ) = mejor solución factible encontrada  $S_j$ 
      Mientras  $g < 3$ 
        for  $j = 1:4$ 
          Generar una solución aleatoria  $S_k$  y calcular su valor de la función objetivo  $f(S_k)$ 
        end
        Solución inicial ( $S_n$ ) = mejor solución factible encontrada  $S_k$ 
        Mientras  $l < 3$ 
          Generar una solución vecina ( $S_v$ ) de  $S_n$ 
          Calcular su valor de la función objetivo  $f(S_v)$ 
          for  $i = 1:2$ 
            Generar una solución vecina ( $S_u$ ) de  $S_v$ 
            Calcular su valor de la función objetivo  $f(S_u)$ 
          end
          Mejor vecino ( $S_{mv}$ ) = mejor solución factible encontrada  $S_u$ 
          Si  $f(S_v) < f(S_{mv})$  Solución actual ( $S_a$ ) =  $S_{mv}$  , de lo contrario  $S_a = S_v$ 
          Si  $f(S_a) < f(S_n)$  Solución actual ( $S_a$ ) =  $S_n$  , de lo contrario  $S_a = S_a$ 
        end
        Si  $f(S_a) < f(S_g)$  Solución actual ( $S_a$ ) =  $S_n$  , de lo contrario  $S_a = S_a$ 
      end
      Calcular  $\Delta E = f(S_a) - f(S_{b'})$ 
      Si  $\Delta E < 0$  Actualizar  $S_a = S_{b'}$ 
      Si  $\Delta E \geq 0$  Actualizar  $S_a = S_{b'}$  con una probabilidad  $P(\Delta E)$ 
    end
     $T^\circ = \alpha \cdot T^\circ$ 
  end
  Mejor solución obtenida =  $S_a$ 

```

Figura 3.7 Pseudocódigo del algoritmo de recocido simulado con multiarreglo.

3.4.1.7 Algoritmo genético simple (GNS)

```
Definir:
Tasa de mutación = 0.09

for k = 1:300
    Generar una solución aleatoria  $S_i$  y calcular su valor de la función objetivo  $f(S_i)$ 
end
Población inicial (A) =  $\{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i300}\}$ 
Población actual (B) = mejores 21 soluciones aleatorias ( $S_{ik}$ )
for n= 1:445
    for m= 1:20
        Selección de dos soluciones  $S_{ik}$  (padres)
        a1= round (1+rand*1667)
        Cruza entre padres en el punto a, generando 2 soluciones (hijos) ( $S_{h1}$ ) y ( $S_{h2}$ )
        Mutación en un solo punto para  $S_{h1}$  y  $S_{h2}$ :
        if rand  $\leq$  tasa de mutación
            select= rand
            if rand  $\leq$  1/3
                Sel = round (1+rand*555)
                Si el valor de la celda (Sel) = 1, cambiar a 0 y viceversa
            elseif rand  $\leq$  2/3
                Sel = round (557+rand*1111)
                Si el valor de la celda (Sel) = 1, cambiar a 2
                Si el valor de la celda (Sel) = 2, cambiar a 3
                Si el valor de la celda (Sel) = 3, cambiar a 1
            else
                Sel = round (1113+rand*1667)
                Cambiar la intensidad de corta de acuerdo al tratamiento silvícola de la celda (Sel)
            end
        end
        end
        Reparar  $S_{h1}$  y  $S_{h2}$ 
        Calcular su valor de la función objetivo  $f(S_{h1})$  y  $f(S_{h2})$ 
        Seleccionar a la mejor solución  $S_h$  (hijo)
    end
    Seleccionar la mejor solución ( $S_{bik}$ ) de la población A
    Población actual = soluciones  $S_h$  (hijos) y la solución  $S_{ik}$ 
end
Mejor solución obtenida = mejor solución factible de la población actual
```

Figura 3.8 Pseudocódigo del algoritmo genético simple.

3.4.1.8 Algoritmo genético de mutación múltiple (GN2)

```
Definir:
Tasa de mutación = 0.09

for k = 1:300
    Generar una solución aleatoria  $S_i$  y calcular su valor de la función objetivo  $f(S_i)$ 
end
Población inicial (A) = {  $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i300}$  }
Población actual (B) = mejores 21 soluciones aleatorias (  $S_{ik}$  )
for n= 1:445
    for m= 1:20
        Selección de dos soluciones  $S_{ik}$  (padres)
        a1= round (1+rand*1667)
        Cruza entre padres en el punto a, generando 2 soluciones (hijos) ( $S_{h1}$ ) y ( $S_{h2}$ )
        Mutación múltiple para  $S_{h1}$  y  $S_{h2}$ :
        if rand  $\leq$  tasa de mutación
            a1= round (1+rand*555)
            Si el valor de la celda (a1) = 1, cambiar a 0 y viceversa
        end
        if rand  $\leq$  tasa de mutación
            a2 = round (557+rand*1111)
            Si el valor de la celda (a2) = 1, cambiar a 2
            Si el valor de la celda (a2) = 2, cambiar a 3
            Si el valor de la celda (Sel) = 3, cambiar a 1
        end
        if rand  $\leq$  tasa de mutación
            a3 = round (1113+rand*1667)
            Cambiar la intensidad de corta de acuerdo al tratamiento silvícola de la celda (a3)
        end
        Reparar  $S_{h1}$  y  $S_{h2}$ 
        Calcular su valor de la función objetivo  $f(S_{h1})$  y  $f(S_{h2})$ 
        Seleccionar a la mejor solución  $S_h$  (hijo)
    end
    Seleccionar la mejor solución ( $S_{bik}$ ) de la población A
    Población actual = soluciones  $S_h$  (hijos) y la solución  $S_{ik}$ 
end
Mejor solución obtenida = mejor solución factible de la población actual
```

Figura 3.9 Pseudocódigo del algoritmo genético con mutación múltiple.

3.4.1.9 Algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo (GN3)

```
Definir:
Tasa de mutación = 0.09

for  $k = 1:300$ 
    Generar una solución aleatoria  $S_i$  y calcular su valor de la función objetivo  $f(S_i)$ 
end
Población inicial (A) =  $\{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{i300}\}$ 
Población actual (B) = mejores 21 soluciones aleatorias ( $S_{ik}$ )
for  $n = 1:445$ 
    for  $m = 1:20$ 
        Selección de dos soluciones  $S_{ik}$  (padres)
         $a1 = \text{round}(1 + \text{rand} * 1667)$ 
        Cruza entre padres en el punto a, generando 2 soluciones (hijos) ( $S_{h1}$ ) y ( $S_{h2}$ )
        Mutación múltiple para  $S_{h1}$  y  $S_{h2}$ :
        if  $\text{rand} \leq \text{tasa de mutación}$ 
             $a1 = \text{round}(1 + \text{rand} * 555)$ 
            Si el valor de la celda ( $a1$ ) = 1, cambiar a 0 y viceversa
        end
        if  $\text{rand} \leq \text{tasa de mutación}$ 
             $a2 = \text{round}(557 + \text{rand} * 1111)$ 
            Si el valor de la celda ( $a2$ ) = 1, cambiar a 2
            Si el valor de la celda ( $a2$ ) = 2, cambiar a 3
            Si el valor de la celda ( $a2$ ) = 3, cambiar a 1
        end
        if  $\text{rand} \leq \text{tasa de mutación}$ 
             $a3 = \text{round}(1113 + \text{rand} * 1667)$ 
            Cambiar la intensidad de corta de acuerdo al tratamiento silvícola de la celda ( $a3$ )
        end
        Reparar  $S_{h1}$  y  $S_{h2}$ 
        Calcular su valor de la función objetivo  $f(S_{h1})$  y  $f(S_{h2})$ 
        Seleccionar a la mejor solución  $S_h$  (hijo)
    end
    Seleccionar la mejor solución ( $S_{bik}$ ) de la población A
    Población total = Población inicial y mejores soluciones  $S_{hm}$ 
    Población actual = soluciones seleccionadas a través de la función de mejora
end
Mejor solución obtenida = mejor solución factible de la población actual
```

Figura 3.10 Pseudocódigo del algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1. Búsqueda local simple (BLS)

De las 20 soluciones obtenidas por la técnica de búsqueda local simple, el máximo ingreso económico en el horizonte de planeación para la comunidad de San Pedro El Alto alcanzó los \$936.5 millones de pesos, mientras que la peor solución estimo \$852.1 millones de pesos. De acuerdo con la información presentada en el Cuadro 3.1, el 25 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$904.2 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 19.1 millones.

Cuadro 3.1 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica BLS.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
912.1	918.0	852.1	936.5	904.2	924.4	19.1

La mejor solución encontrada (\$936.5 millones de pesos) asignó 1377.48 ha a la zona de conservación, 1541.64 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5507.55 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.12). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial para 505.02 ha, 2° cosecha comercial para 374.84 ha y 3° cosecha comercial para 661.78 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 1195.25 ha, aclareo comercial normal para 3639.96 ha y corta de regeneración para 672.34 ha (Anexo 1).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 202.4 m³ por ha (Anexo 10) y aproximadamente se intervienen 49 rodales por periodo (Anexo 19). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 177 950.70 m³ para productos primarios, 798 027.30 m³ para productos secundarios y 508 749.76 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.2). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo por debajo de la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 149 540.88 m³ anuales, a excepción de los años 6 y 7 que presentaron el volumen de cosecha anual más bajo con 146 037.41 y 142 363.34 m³ respectivamente (Figura 3.11).

Cuadro 3.2 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica BLS.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	0	89 882.38	59 921.59
2	7095.80	85 796.40	56 859.70
3	8226.19	84 500.44	55 941.90
4	10 536.23	83 738.60	55 324.01
5	7122.53	85 669.57	56 773.88
6	16 787.20	78 029.75	51 220.44
7	20 837.88	73 510.64	48 014.81
8	23 533.63	76 060.74	49 586.51
9	30 790.57	72 285.76	46 724.29
10	53 020.70	68 552.95	28 382.57
Total	177 950.70	798 027.30	508 749.76

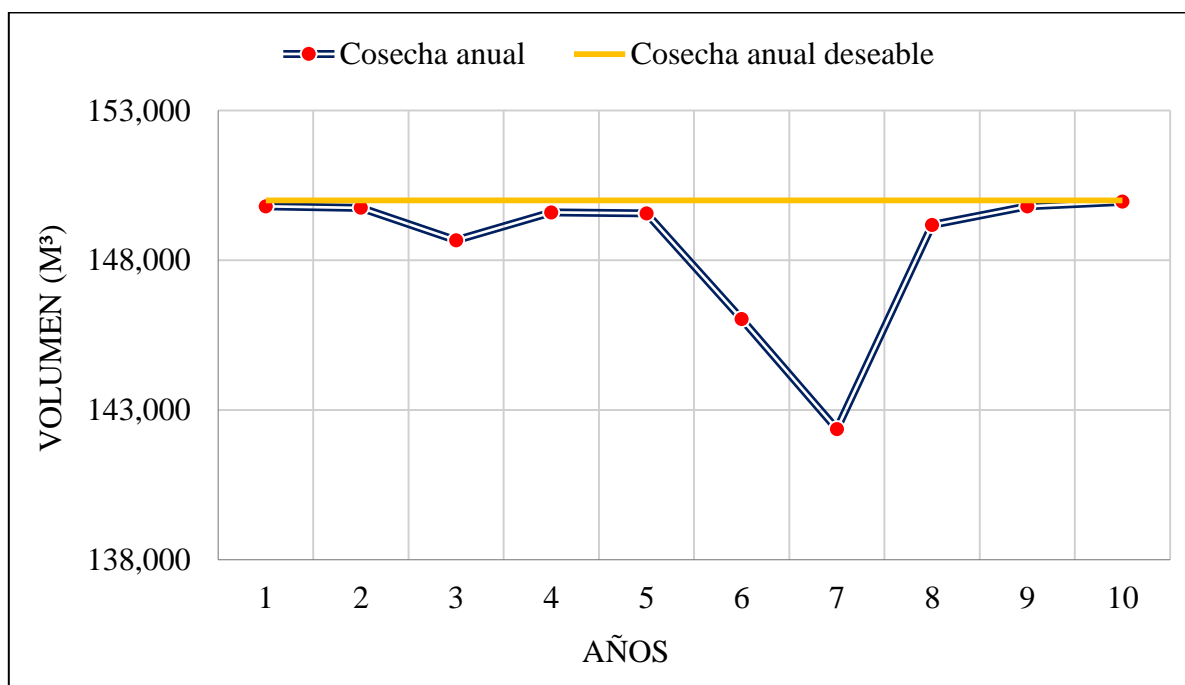


Figura 3.11 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica BLS.

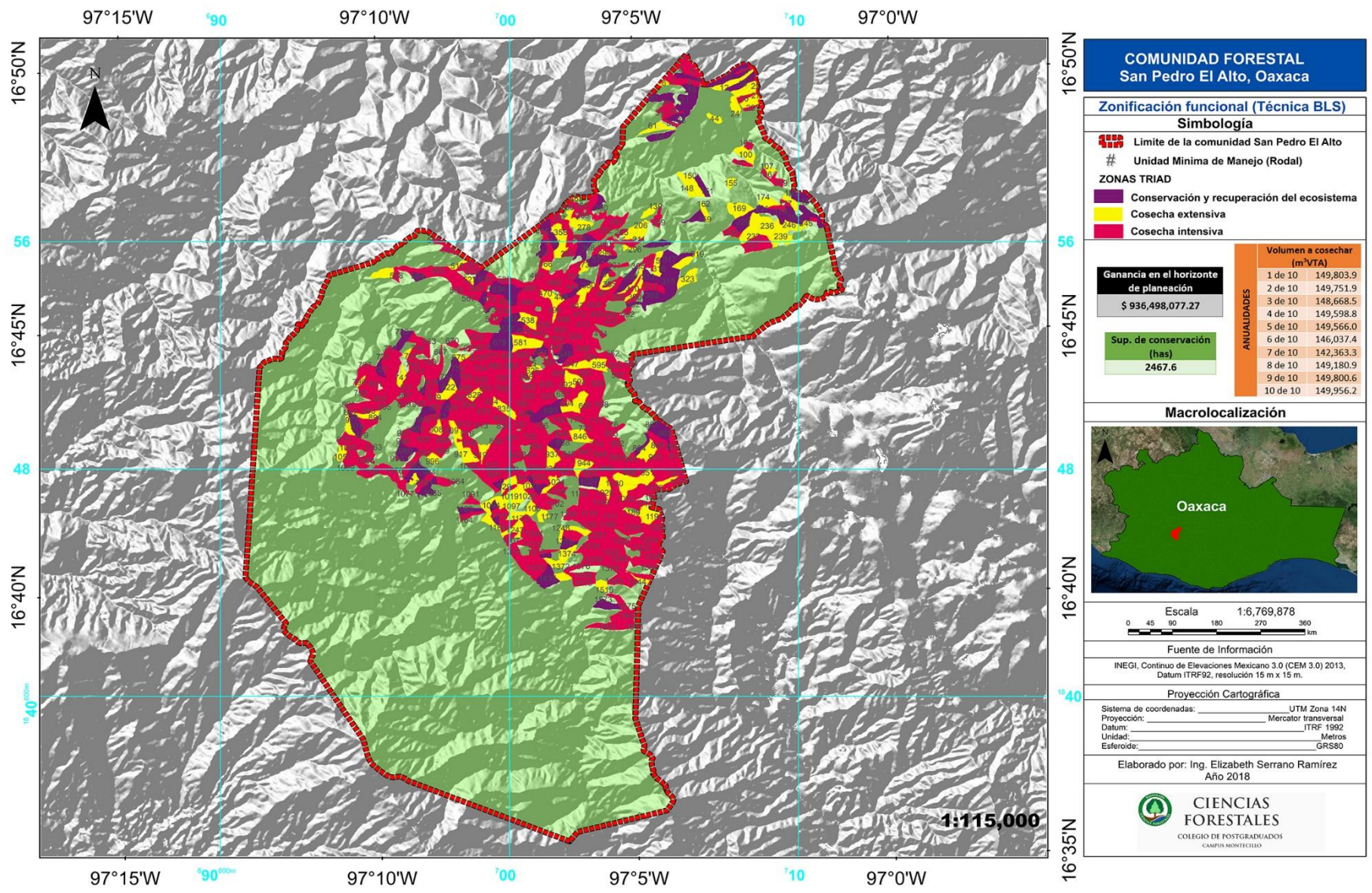


Figura 3.12 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica BLS.

3.5.2 Búsqueda local múltiple (BLM)

De los 20 resultados obtenidos por la técnica de búsqueda local múltiple, el máximo ingreso económico en el horizonte de planeación para la comunidad de San Pedro El Alto alcanzó los \$905.7 millones de pesos, mientras que la peor solución estimo \$843.8 millones de pesos. De acuerdo al Cuadro 3.3, el 75 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$894.2 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 15.7 millones.

Cuadro 3.3 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica BLM.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
883.1	883.3	843.8	905.7	878.9	894.2	15.7

La mejor solución encontrada (\$905.7 millones de pesos) asignó 1514.90 ha a la zona de conservación, 1358.26 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5553.51 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.14). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial para 446.74 ha, 2° cosecha comercial para 410.1 ha y 3° cosecha comercial para 501.40 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 1175.38 ha, aclareo comercial normal para 3757.23 ha y corta de regeneración para 620.91 ha (Anexo 2).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 195.05 m³ por ha (Anexo 11) y aproximadamente se intervienen 47 rodales por periodo (Anexo 20). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 161,148.72 m³ para productos primarios, 792,158.97 m³ para productos secundarios y 508,148.48 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.4). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo por debajo de la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 148 728.39 m³ anuales, a excepción de los años 2, 8 y 9 que, presentaron el volumen de cosecha anual más bajo con 139 750.96, 140 843.94 y 139 762.48 m³, respectivamente (Figura 3.13).

Cuadro 3.4 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica BLM.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	2382.34	88 004.11	58 555.96
2	3086.94	82 086.60	54 577.40
3	12 568.39	82 401.02	54 335.51
4	3836.47	86 622.03	57 565.33
5	6087.09	85 178.86	56 496.04
6	5372.90	85 786.10	56 934.88
7	32 034.04	71 124.47	45 890.88
8	11 717.61	77 810.59	51 315.74
9	26 824.71	68 529.08	44 408.68
10	57 238.18	64 616.07	28 068.00
Total	161 148.72	792 158.97	508 148.48

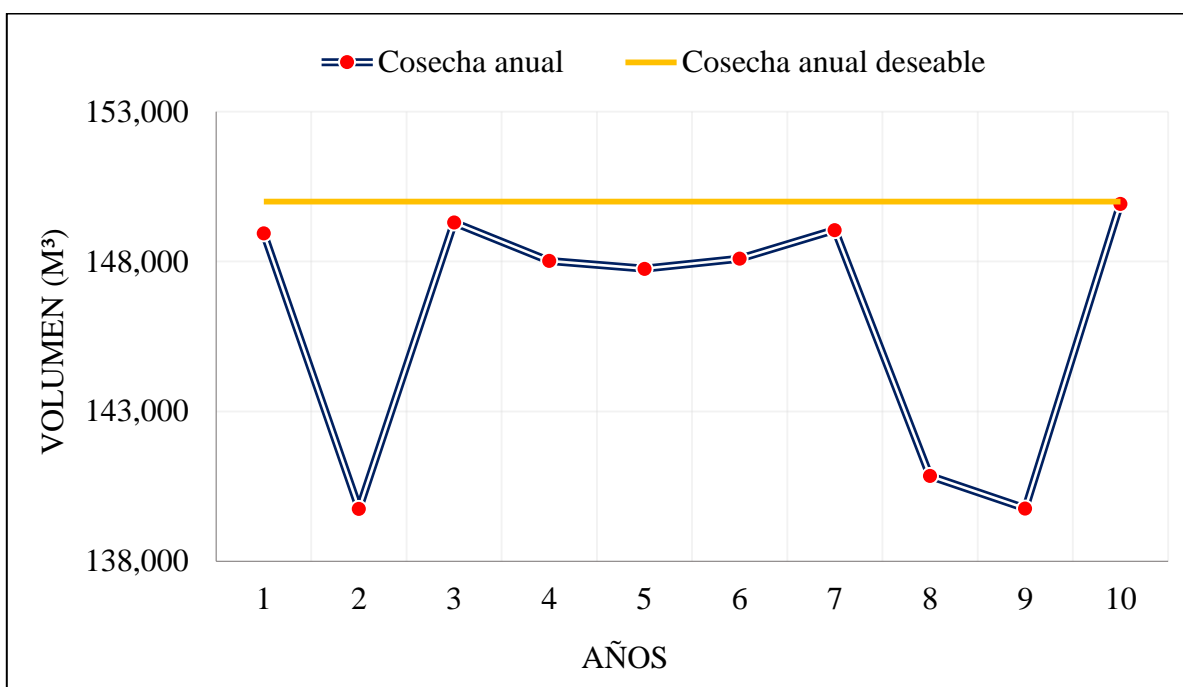


Figura 3.13 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica BLM.

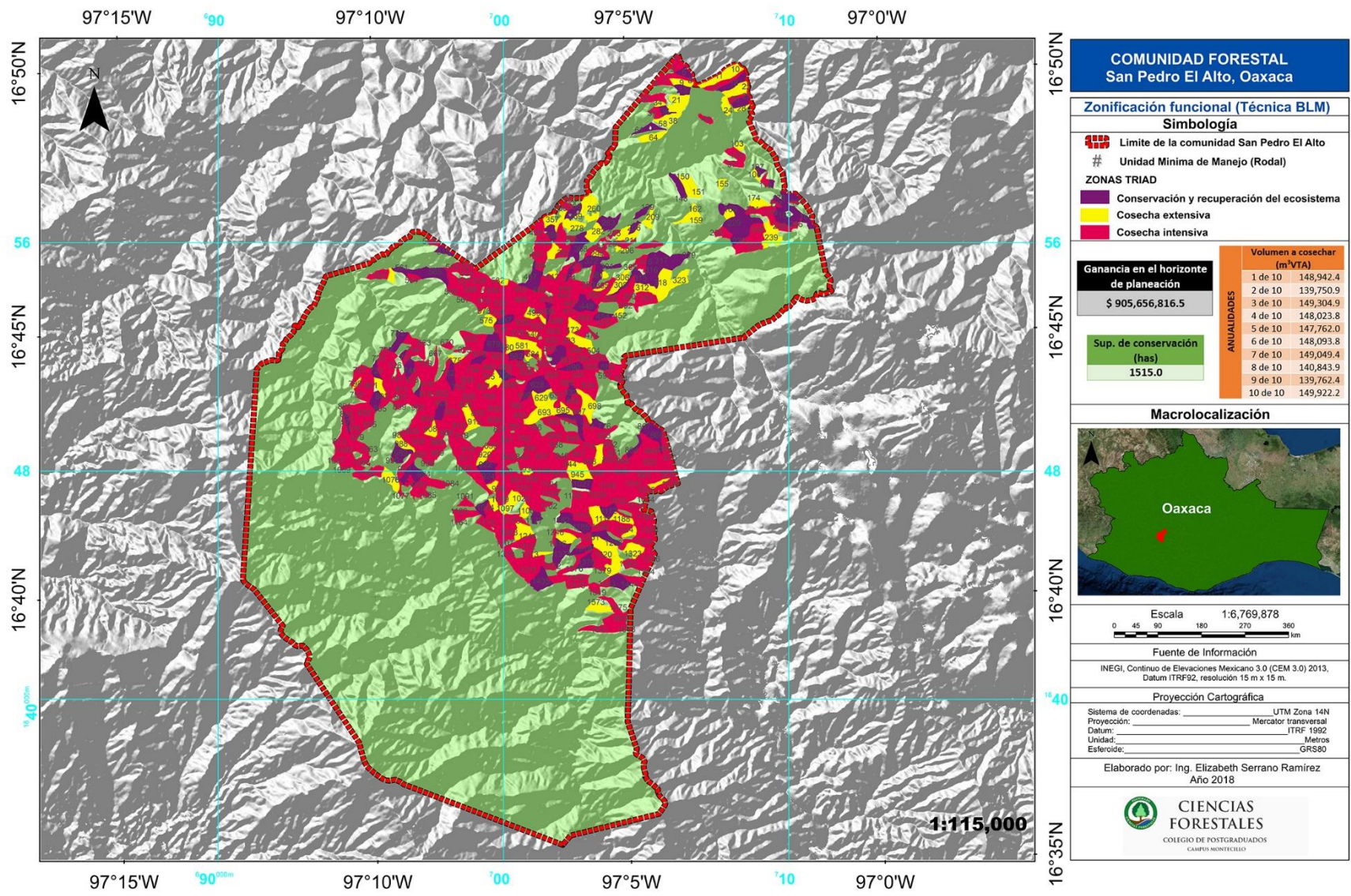


Figura 3.14 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica BLM.

3.5.3 Multiarranque (MTA)

El ingreso económico máximo estimado por la mejor solución, de las 20 obtenidas con la técnica de multiarranque, estimó \$848.4 millones de pesos en el horizonte de planeación, mientras que la peor solución estimó \$808.4 millones de pesos. De acuerdo al Cuadro 3.5, el 50 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$817.9 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 9.0 millones.

Cuadro 3.5 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica MTA.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
820.6	817.9	808.4	848.4	815.0	824.6	9.0

La mejor solución encontrada (\$848.4 millones de pesos) asignó 1976.72 ha a la zona de conservación, 1252.99 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5196.96 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.16). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial para 391.02 ha, 2° cosecha comercial para 434.08 ha y 3° cosecha comercial para 427.88 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 998.03 ha, aclareo comercial normal para 3595.30 ha y corta de regeneración para 603.62 ha (Anexo 3).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 183.55 m³ por ha (Anexo 12) y aproximadamente se intervienen 45 rodales por periodo (Anexo 21). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 154 506.74 m³ para productos primarios, 730 350.30 m³ para productos secundarios y 468 130.00 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.6). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo por debajo de la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 133 711.29 m³ anuales, a excepción del año 8 que presentó un volumen más alto de cosecha anual con 149 585.42 m³ (Figura 3.15).

Cuadro 3.6 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica MTA.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	10 890.46	78 259.50	51 654.41
2	5645.85	73 349.37	48 630.73
3	15 144.77	69 899.20	45 878.28
4	4663.22	67 173.65	44 560.38
5	11 747.88	80 095.46	52 837.55
6	17 907.52	67 797.75	44 345.76
7	13 441.77	76 015.80	50 037.12
8	13 714.31	81 914.50	53 956.60
9	24 075.62	62 528.92	40 539.48
10	37 275.28	73 316.10	35 689.64
Total	154 506.74	730 350.30	468 130.00

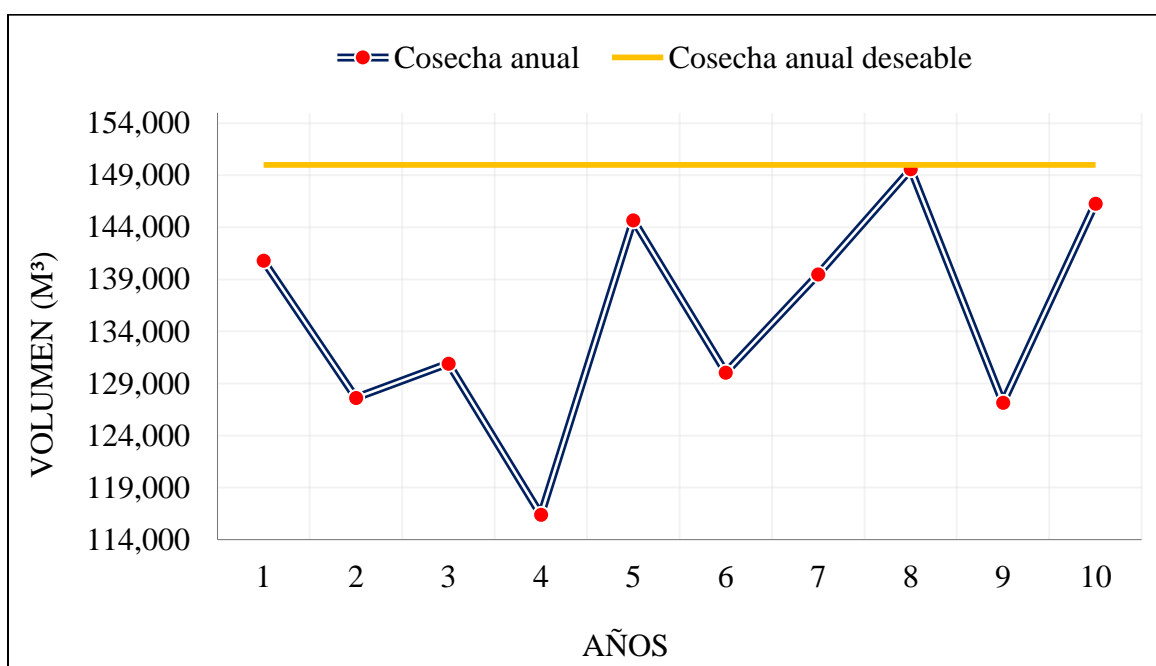


Figura 3.15 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica MTA.

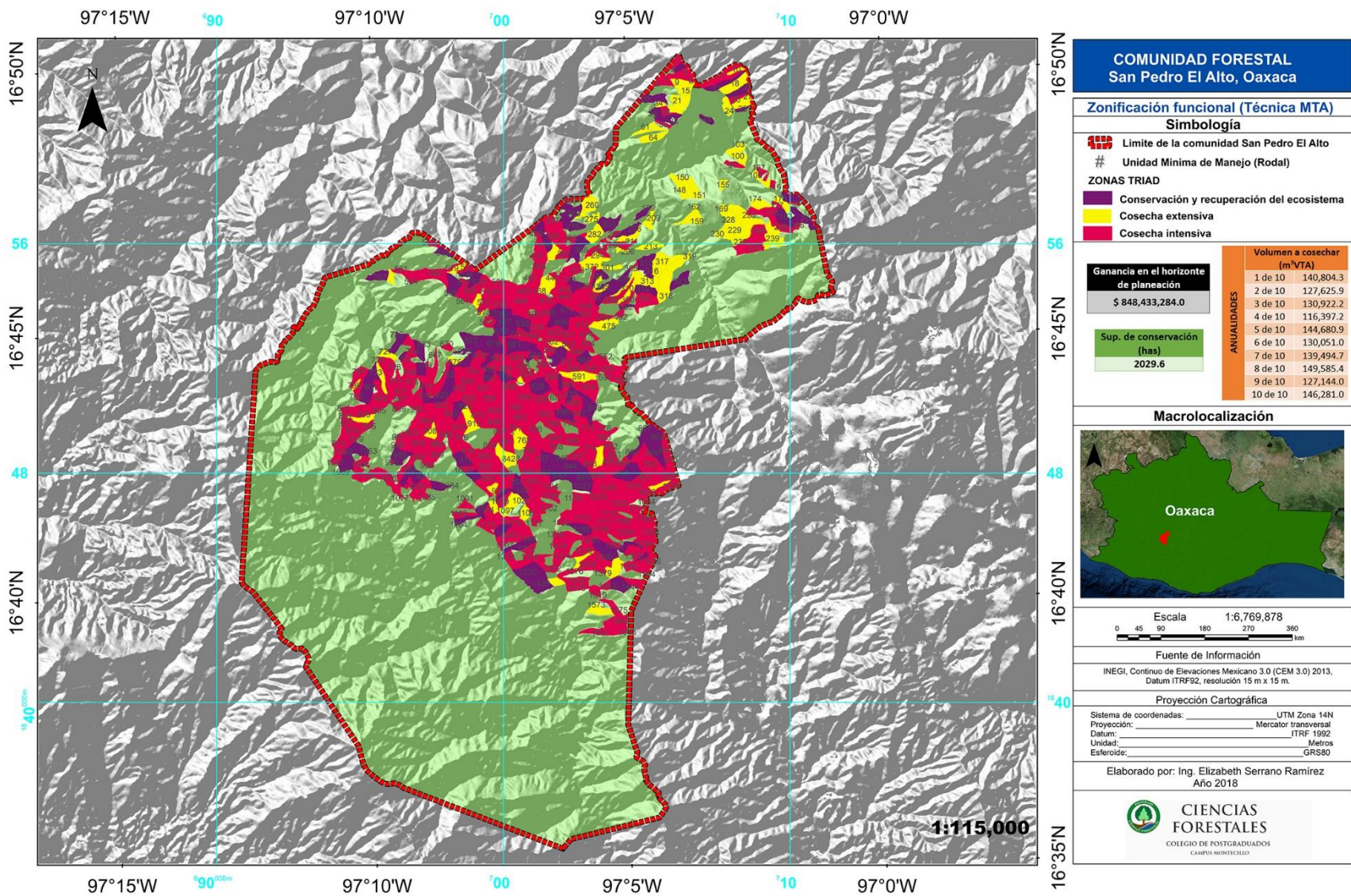


Figura 3.16 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica MTA.

3.5.4 Recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS)

Los resultados obtenidos por la técnica de recocido simulado con búsqueda local simple estimaron un ingreso promedio en el horizonte de planeación de \$933.8 millones de pesos. La mejor solución obtenida por esta técnica estimó un ingreso de \$945.2 millones de pesos y la peor solución \$920.8 millones de pesos. El 50 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$935 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 7.1 millones (Cuadro 3.7).

Cuadro 3.7 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica RBLS.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
933.8	935.0	920.8	945.2	927.5	938.6	7.1

La mejor solución encontrada (\$945.2 millones de pesos) asignó 1354.27 ha a la zona de conservación, 1564.63 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5507.78 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.18). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial para 535.63 ha, 2° cosecha comercial para 482.59 ha y 3° cosecha comercial para 546.41 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 1343.20 ha, aclareo comercial normal para 3388.72 ha y corta de regeneración para 775.85 ha (Anexo 4).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 193.45 m³ por ha (Anexo 13) y aproximadamente se intervienen 49 rodales por periodo (Anexo 22). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 195 598.17 m³ para productos primarios, 795 379.21 m³ para productos secundarios y 508 804.88 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.8). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo muy cercano a la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 149 978.22 m³ anuales (Figura 3.17).

Cuadro 3.8 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica RBLs.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	10 890.46	78 259.50	51 654.41
2	5645.85	73 349.37	48 630.73
3	15 144.77	69 899.20	45 878.28
4	4663.22	67 173.65	44 560.38
5	11 747.88	80 095.46	52 837.55
6	17 907.52	67 797.75	44 345.76
7	13 441.77	76 015.80	50 037.12
8	13 714.31	81 914.50	53 956.60
9	24 075.62	62 528.92	40 539.48
10	37 275.28	73 316.10	35 689.64
Total	154 506.74	730 350.30	468 130.00

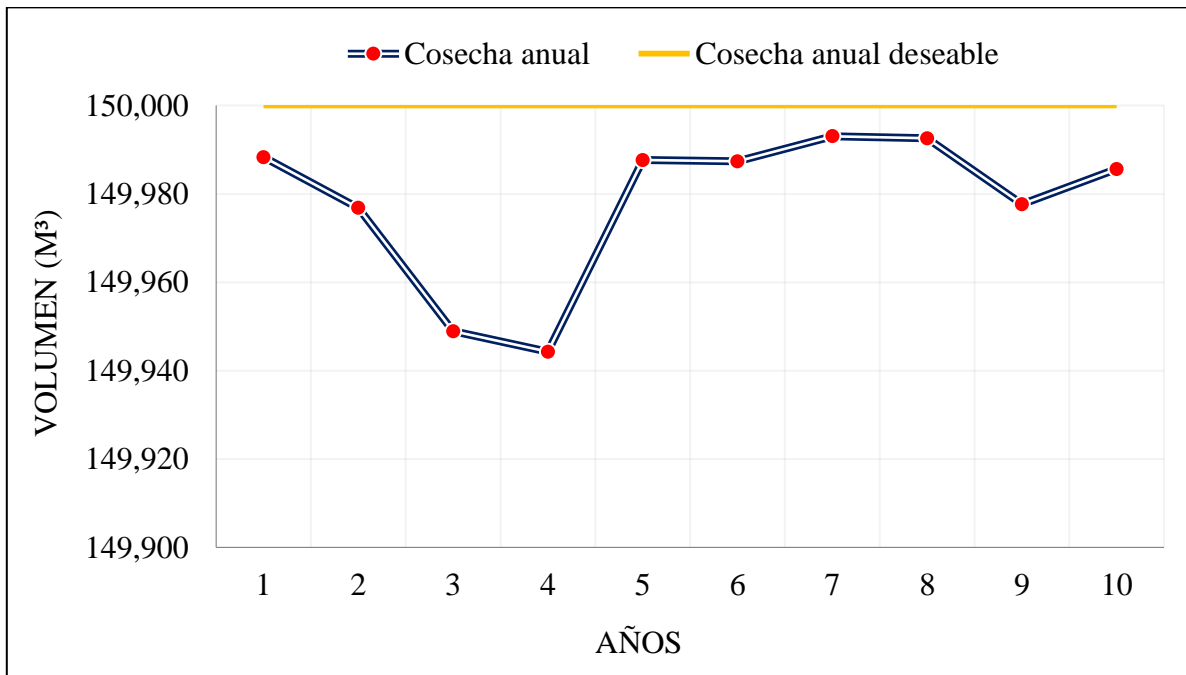


Figura 3.17 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica RBLs.

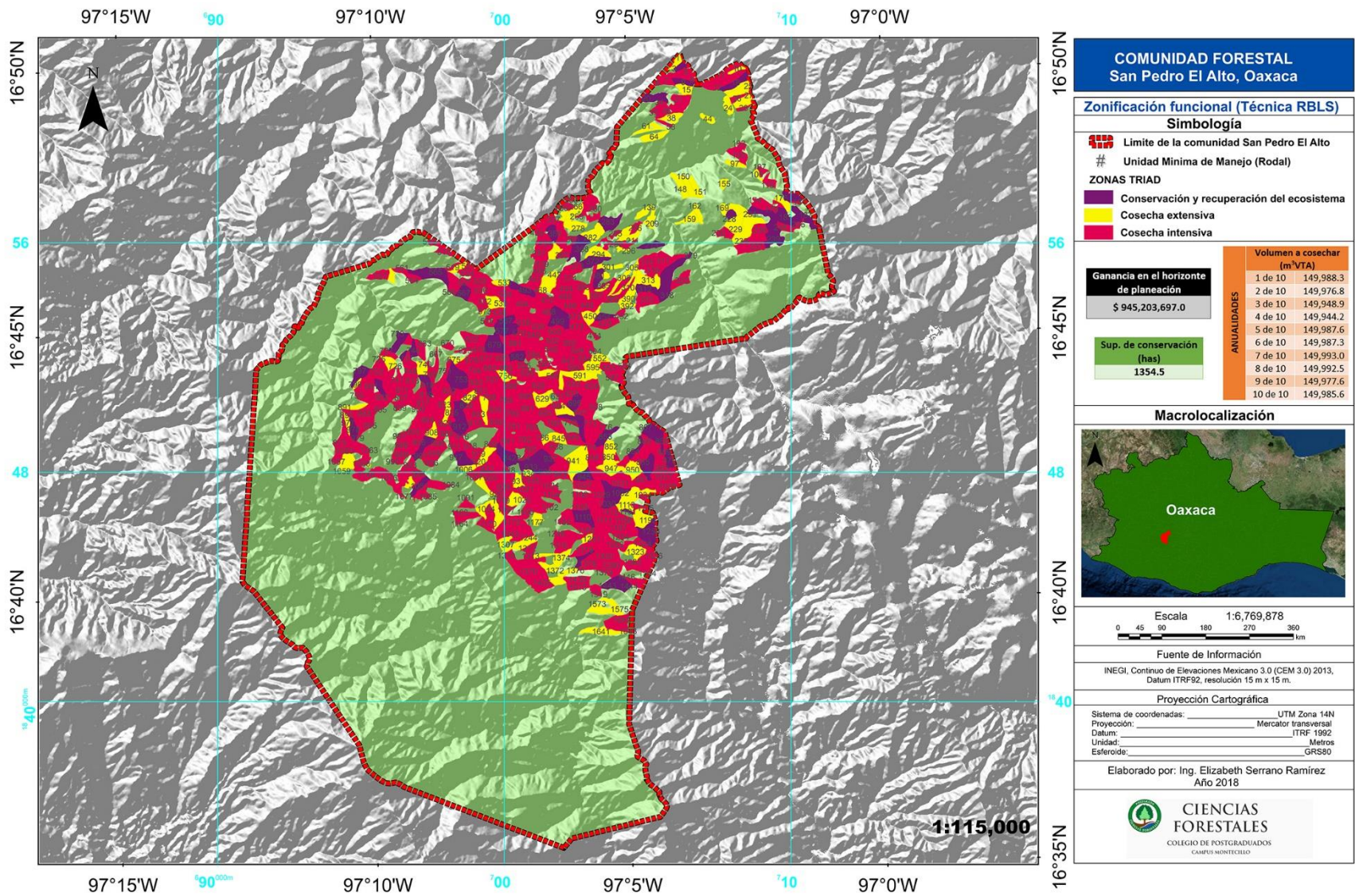


Figura 3.18 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica RBLs.

3.5.5 Recocido simulado con búsqueda local múltiple (RBLM)

El ingreso promedio estimado por las soluciones obtenidas por la técnica de recocido simulado con búsqueda local múltiple es de \$899.5 millones de pesos en el horizonte de planeación para la comunidad de San Pedro El Alto. El máximo ingreso estimado por la mejor solución encontrada corresponde a \$916.0 millones de pesos y el peor ingreso estimado corresponde a \$880.5 millones de pesos. El 75 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$904.1 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 9.0 millones (Cuadro 3.9).

Cuadro 3.9 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica RBLM.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
899.5	901.4	880.5	916.0	894.6	904.1	9.0

La mejor solución encontrada (\$916.0 millones de pesos) asignó 1426.70 ha a la zona de conservación, 1403.75 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5596.22 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.20). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero en 1081.14 ha, aclareo comercial normal en 3908.43 ha y corta de regeneración en 606.65 ha; y para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial en 484.36 ha, 2° cosecha comercial en 356.47 ha y 3° cosecha comercial para 562.93 ha (Anexo 5).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 195.7 m³ por ha (Anexo 14), interviniendo aproximadamente 49 rodales por periodo (Anexo 23). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 167 565.78 m³ para productos primarios, 799 100.32 m³ para productos secundarios y 512 377.70 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.10). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo cercano a la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 149 374.57 m³ anuales, a excepción del año 2 que presentó un volumen de cosecha anual más bajo con 134 672.62 m³ (Figura 3.19).

Cuadro 3.10 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica RBLM.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	1678.42	88 732.89	59075.33
2	3837.96	78 610.45	52224.202
3	5944.07	86 584.61	57440.02
4	4660.59	86 751.99	57612.73
5	4953.09	86 971.21	57744.94
6	24 522.48	73 903.75	48101.43
7	14 065.92	81 908.39	53935.79
8	10 962.65	83 692.78	55273.15
9	43 086.93	65 354.07	41517.62
10	53 853.62	66 590.13	29452.44
Total	167 565.78	799 100.32	512 377.70

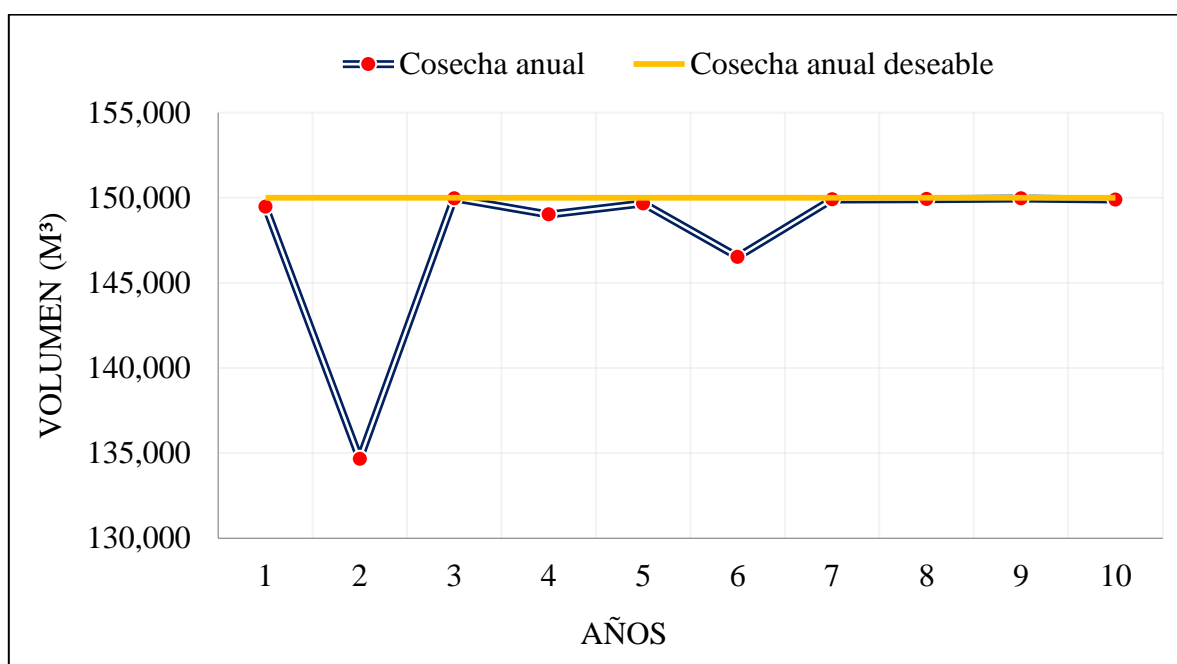


Figura 3.19 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica RBLM.

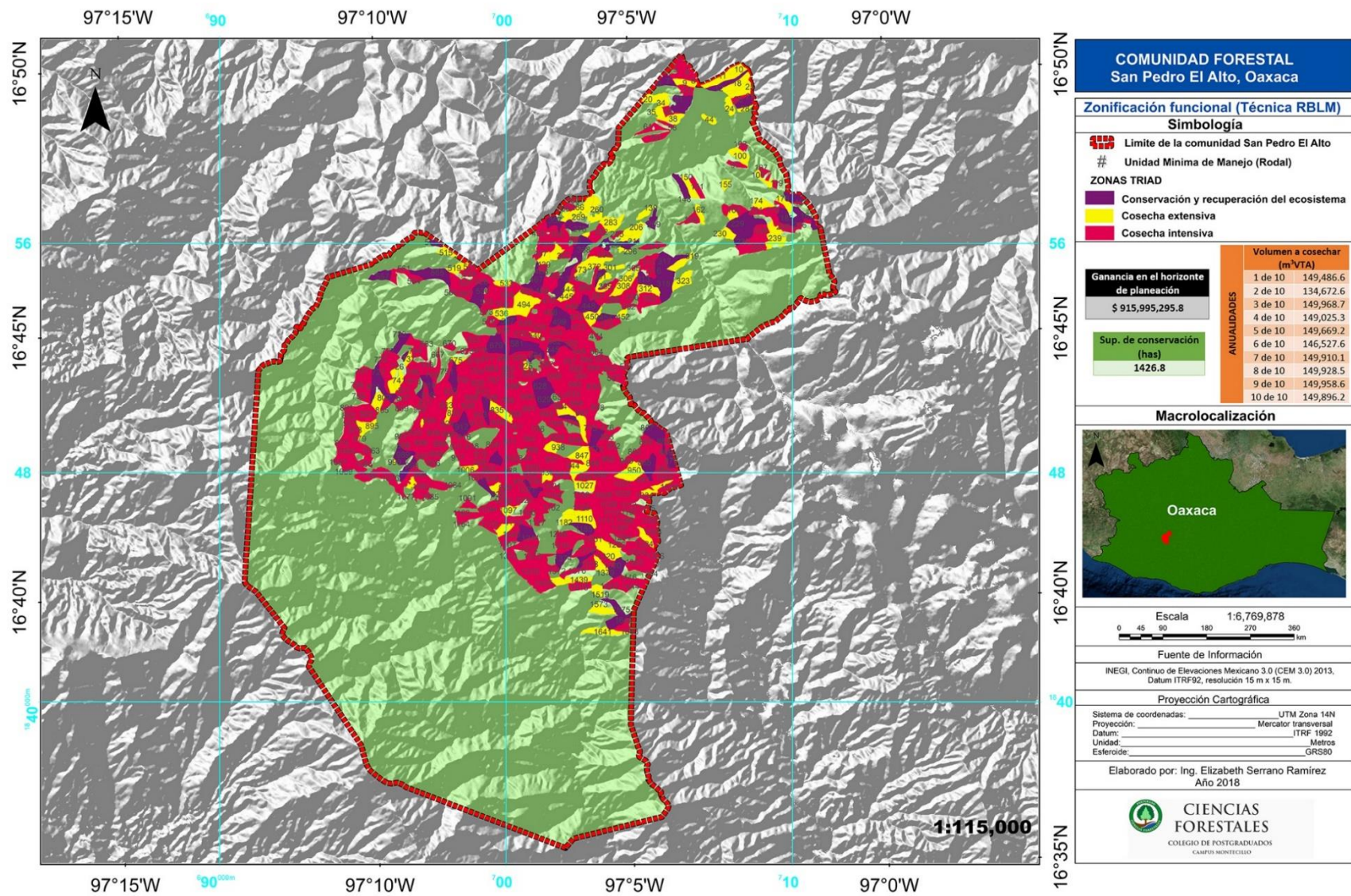


Figura 3.20 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica RBLM.

3.5.6 Recocido simulado con multiarranque (RMTA)

De las 20 soluciones obtenidas por la técnica de recocido simulado con multiarranque, el máximo ingreso económico en el horizonte de planeación para la comunidad de San Pedro El Alto alcanzó los \$796.4 millones de pesos, mientras que la peor solución estimo \$768.3 millones de pesos. De acuerdo al Cuadro 3.11, el 50 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$779.6 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 6.9 millones.

Cuadro 3.11 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica RMTA.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
780.6	779.6	768.3	796.4	775.2	785.5	6.9

La mejor solución encontrada (\$796.4 millones de pesos) asignó 2469.89 ha a la zona de conservación, 899.07 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5057.71 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 4.22). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial para 243.14 ha, 2° cosecha comercial para 378.25 ha y 3° cosecha comercial para 277.68 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 1154.97 ha, aclareo comercial normal para 3275.64 ha y corta de regeneración para 627.10 ha (Anexo 6).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 181.15 m³ por ha (Anexo 15) con la intervención de 43 rodales por periodo (Anexo 24). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 155 200.49 m³ para productos primarios, 670 231.85 m³ para productos secundarios y 434 119.93 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.12). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo muy por debajo de la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 123 333.90 m³ anuales, a excepción del año 4 que presentó un volumen de cosecha anual más alto con 149 547.15 m³ (Figura 3.21).

Cuadro 3.12 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica RMTA.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	3149.91	58 084.20	38 572.80
2	1031.05	55 107.68	36 689.35
3	8727.88	77 495.57	51 248.10
4	7827.52	85 255.41	56 464.20
5	8977.46	77 253.58	51 074.89
6	23 635.36	72 315.24	47 084.66
7	25 608.18	61 771.58	39 961.61
8	16 980.83	69 418.31	45 470.26
9	16 265.98	52 812.98	34 434.08
10	42 996.27	60 717.25	33 119.92
Total	155 200.49	670 231.85	434 119.93

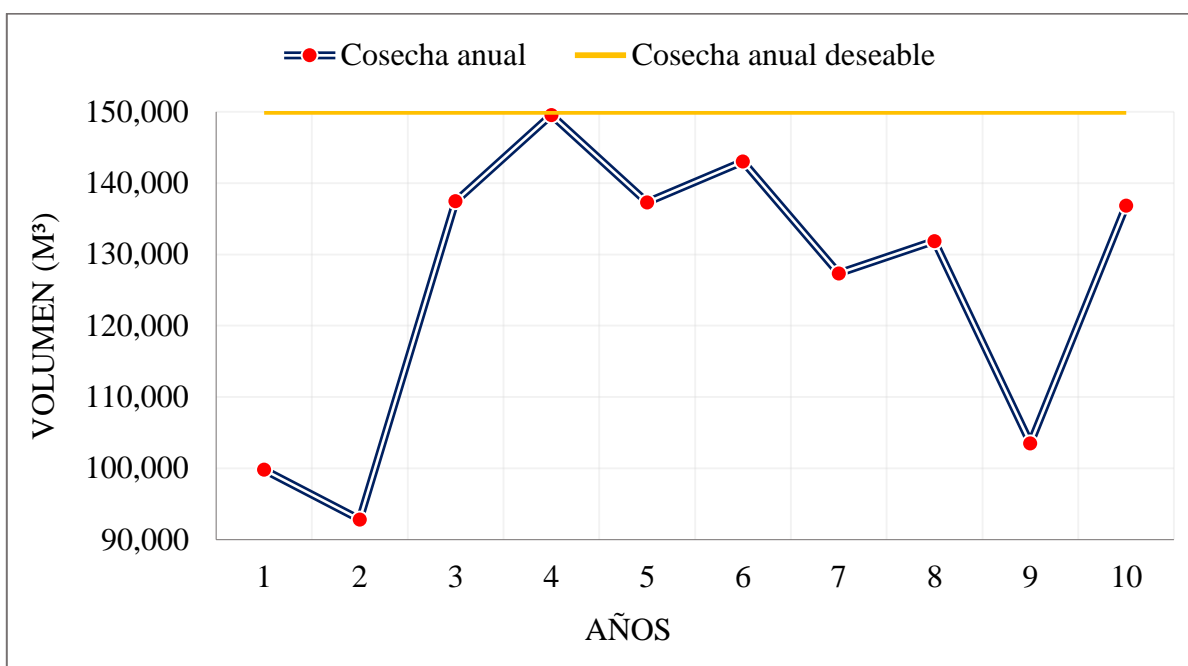


Figura 3.21 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica RMTA.

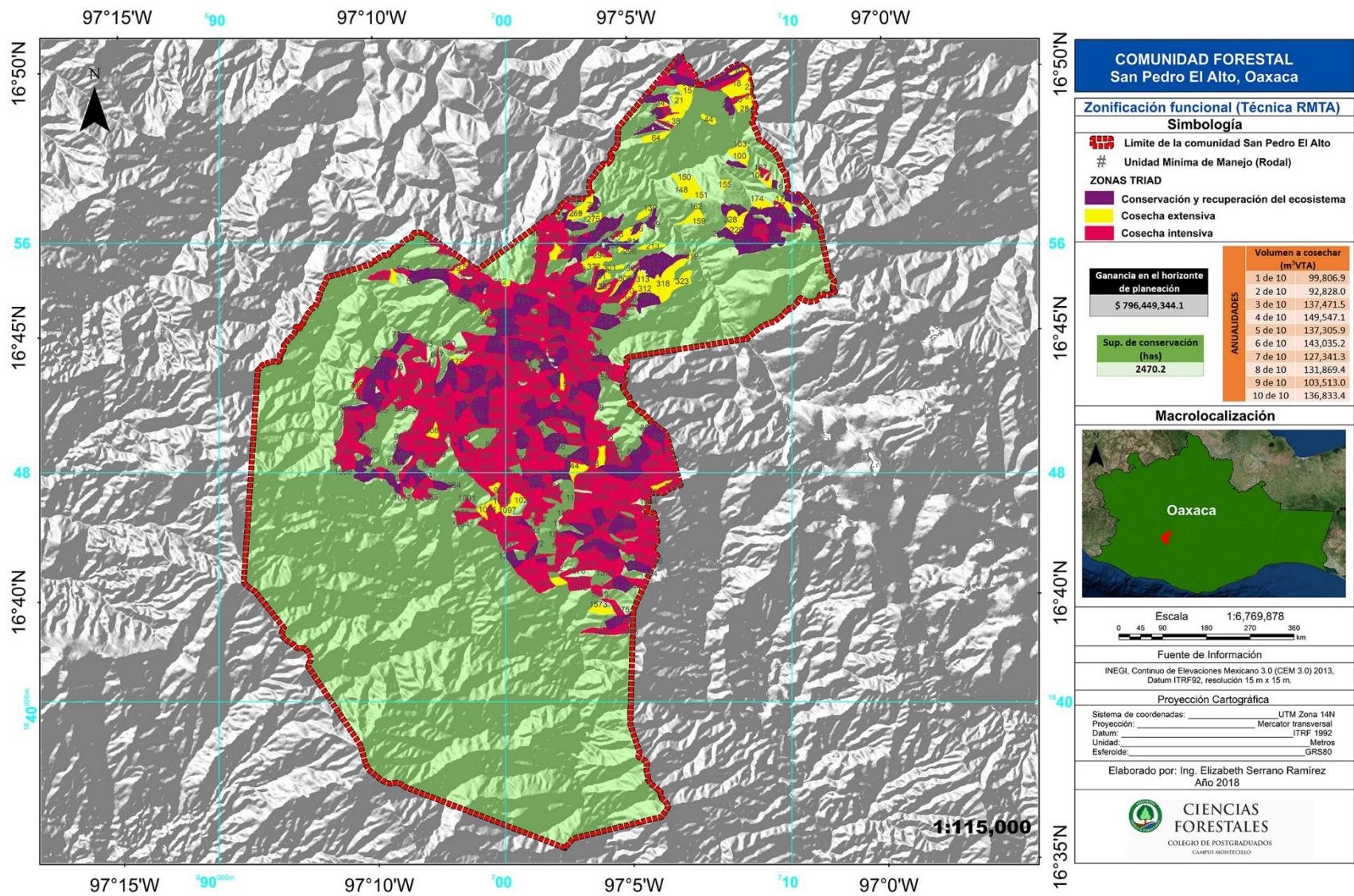


Figura 3.22 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica RMTA.

3.5.7 Algoritmo genético simple (GNS)

De los 20 resultados obtenidos por el algoritmo genético en su versión simple, el máximo ingreso económico en el horizonte de planeación para la comunidad de San Pedro El Alto alcanzó los \$828.2 millones de pesos, mientras que la peor solución estimó \$797.1 millones de pesos. De acuerdo al Cuadro 3.13, el 75 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$814.8 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 8.9 millones.

Cuadro 3.13 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica GNS.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
808.9	808.6	797.1	828.2	801.4	814.8	8.9

La mejor solución encontrada (\$828.2 millones de pesos) asignó 2254.74 ha a la zona de conservación, 806.73 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5365.21 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.24). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial en 158.68 ha, 2° cosecha comercial para 464.20 ha y 3° cosecha comercial en 183.84 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 1263.87 ha, aclareo comercial normal en 3480.74 ha y corta de regeneración en 620.60 ha (Anexo 7).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 187.79 m³ por ha (Anexo 16) y aproximadamente se intervienen 43 rodales por periodo (Anexo 25). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 146 268.48 m³ para productos primarios, 710 508.26 m³ para productos secundarios y 463 171.67 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.14). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo por debajo de la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 137 882.18 m³ anuales, a excepción del año 7 y 10 que presentaron el volumen de cosecha anual más bajo con 113 845.00 y 103 045.91 m³ respectivamente (Figura 3.23).

Cuadro 3.14 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica GNS.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	0	83 706.52	55 804.35
2	9346.27	71 267.66	47 066.71
3	4900.90	75 455.39	50 070.21
4	14 172.51	77 750.16	51 158.55
5	7326.47	77 048.48	51 016.77
6	8849.40	81 573.59	53 960.99
7	14 813.69	59 842.03	39 189.27
8	17 199.34	71 861.27	47 088.50
9	34 639.22	68 066.17	43 727.96
10	35 020.64	43 936.95	24 088.31
Total	146 268.48	710 508.26	463 171.67

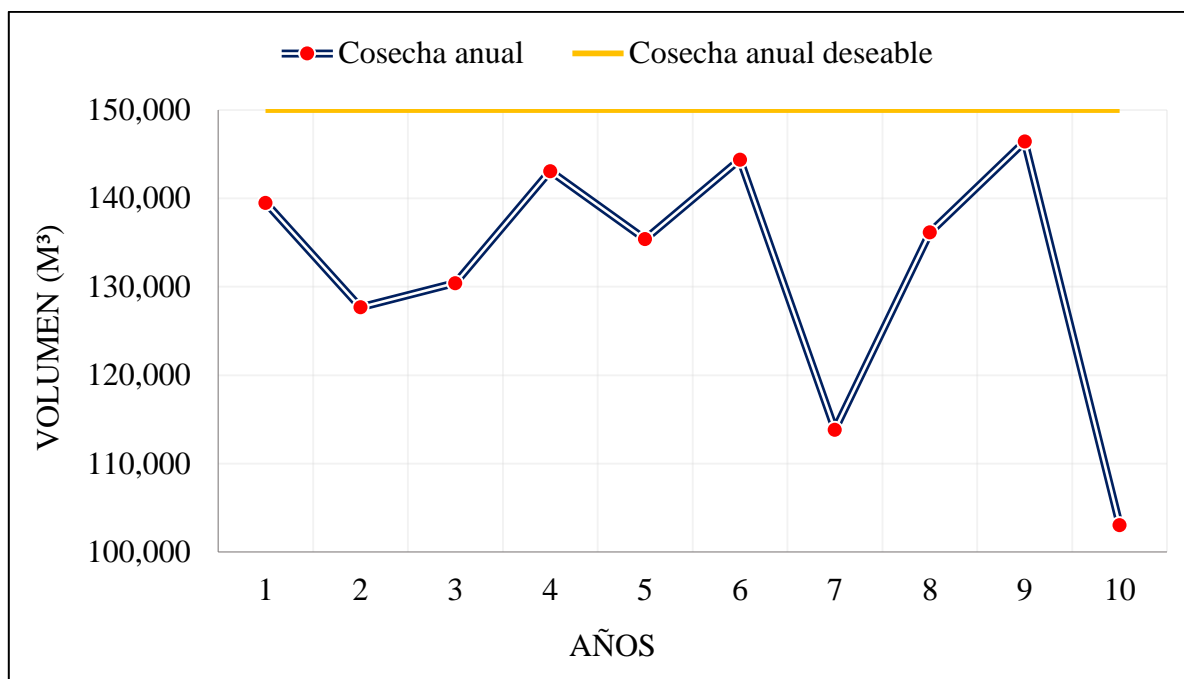


Figura 3.23 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica GNS.

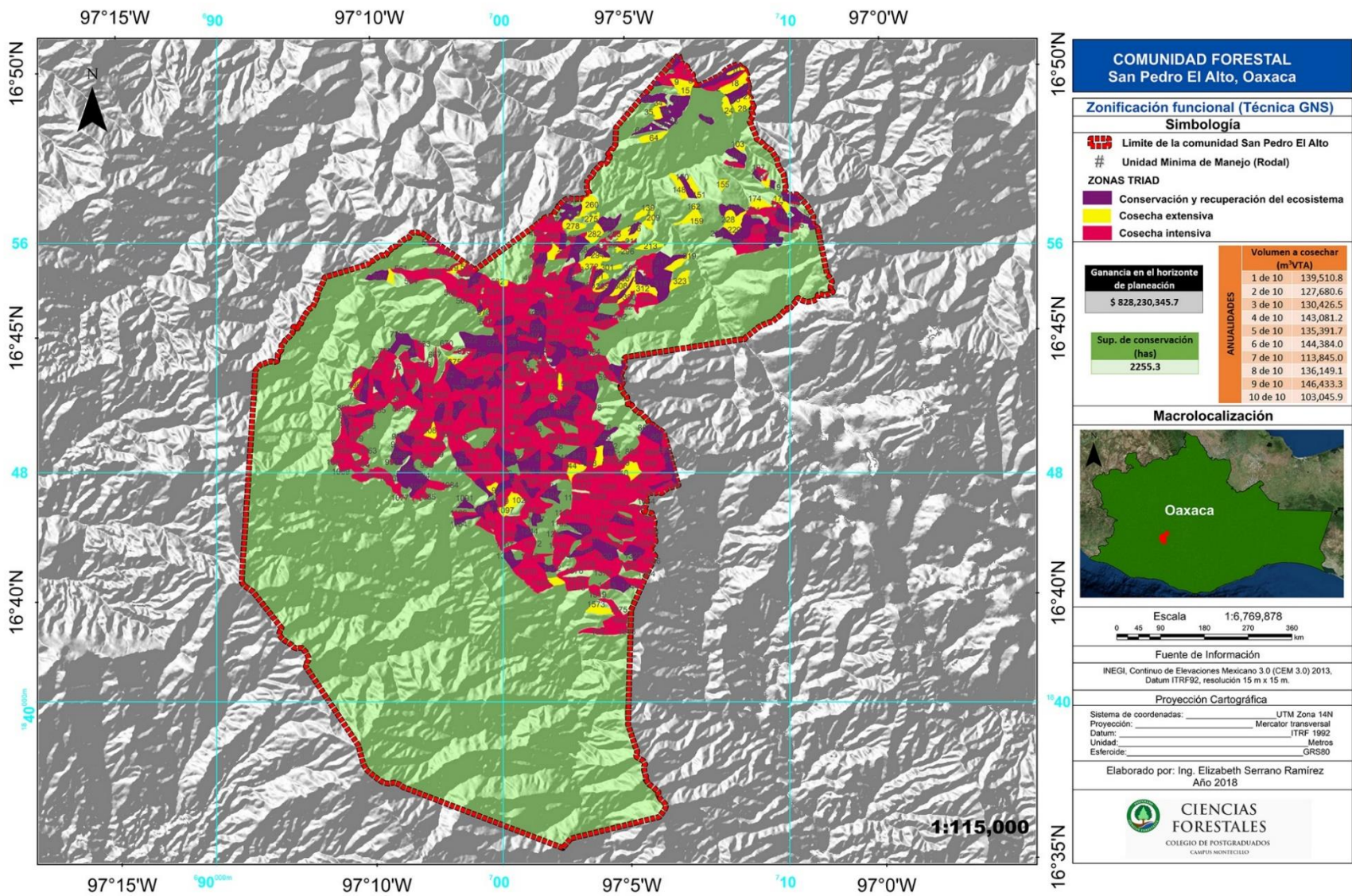


Figura 3.24 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica GNS..

3.5.8 Algoritmo genético de mutación múltiple (GN2)

El ingreso económico máximo estimado por la mejor solución, de las 20 obtenidas con la técnica de multiarranque, estimó \$834.0 millones de pesos en el horizonte de planeación, mientras que la peor solución estimó \$789.9 millones de pesos. De acuerdo al Cuadro 3.15, el 50 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$811.1 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 9.4 millones.

Cuadro 3.15 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica GN2.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
810.9	811.1	789.9	834.0	806.3	814.3	9.4

La mejor solución encontrada (\$834.0 millones de pesos) asignó 2107.18 ha a la zona de conservación, 922.42 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5397.07 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.26). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial para 290.29 ha, 2° cosecha comercial para 393.89 ha y 3° cosecha comercial para 238.25 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 1127.75 ha, aclareo comercial normal para 3657.10 ha y corta de regeneración para 612.22 ha (Anexo 8).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 187.87 m³ por ha (Anexo 17) y aproximadamente se intervienen 44 rodales por periodo (Anexo 26). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 144 582.18 m³ para productos primarios, 721 829.04 m³ para productos secundarios y 470 703.44 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.16). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo por debajo de la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 138 286.02 m³ anuales, a excepción del año 1 y 9 que presentaron los volúmenes más bajos de cosecha anual con 111 586.70 y 119 239.74 m³ respectivamente (Figura 3.25).

Cuadro 3.16 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica GN2.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	9582.20	61 476.47	40 528.02
2	1691.45	86 632.99	57 674.78
3	11 000.89	72 987.86	48 134.72
4	9049.38	82 377.81	54 487.61
5	1001.17	86 876.16	57 869.76
6	10 309.40	74 568.96	49 221.72
7	26 309.28	58 021.15	37 427.94
8	30 383.20	70 138.66	45 312.29
9	13 856.42	63 625.89	41 757.43
10	31 398.75	65 123.04	38 289.13
Total	144 582.18	721 829.04	470 703.44

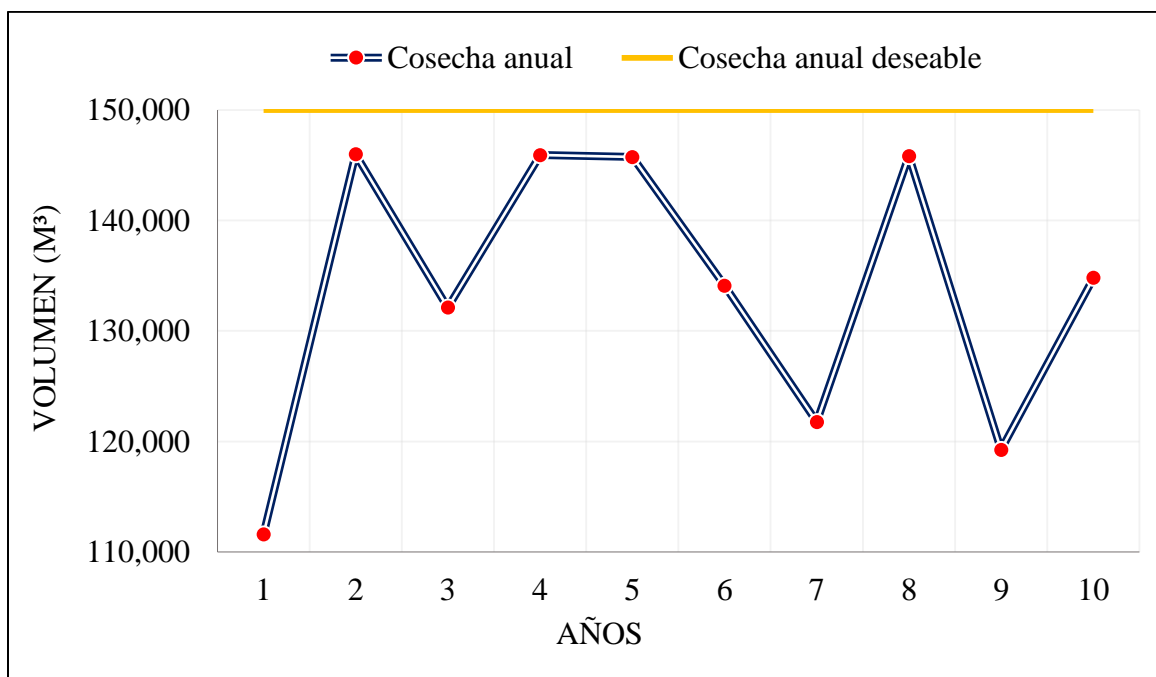


Figura 3.25 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica GN2..

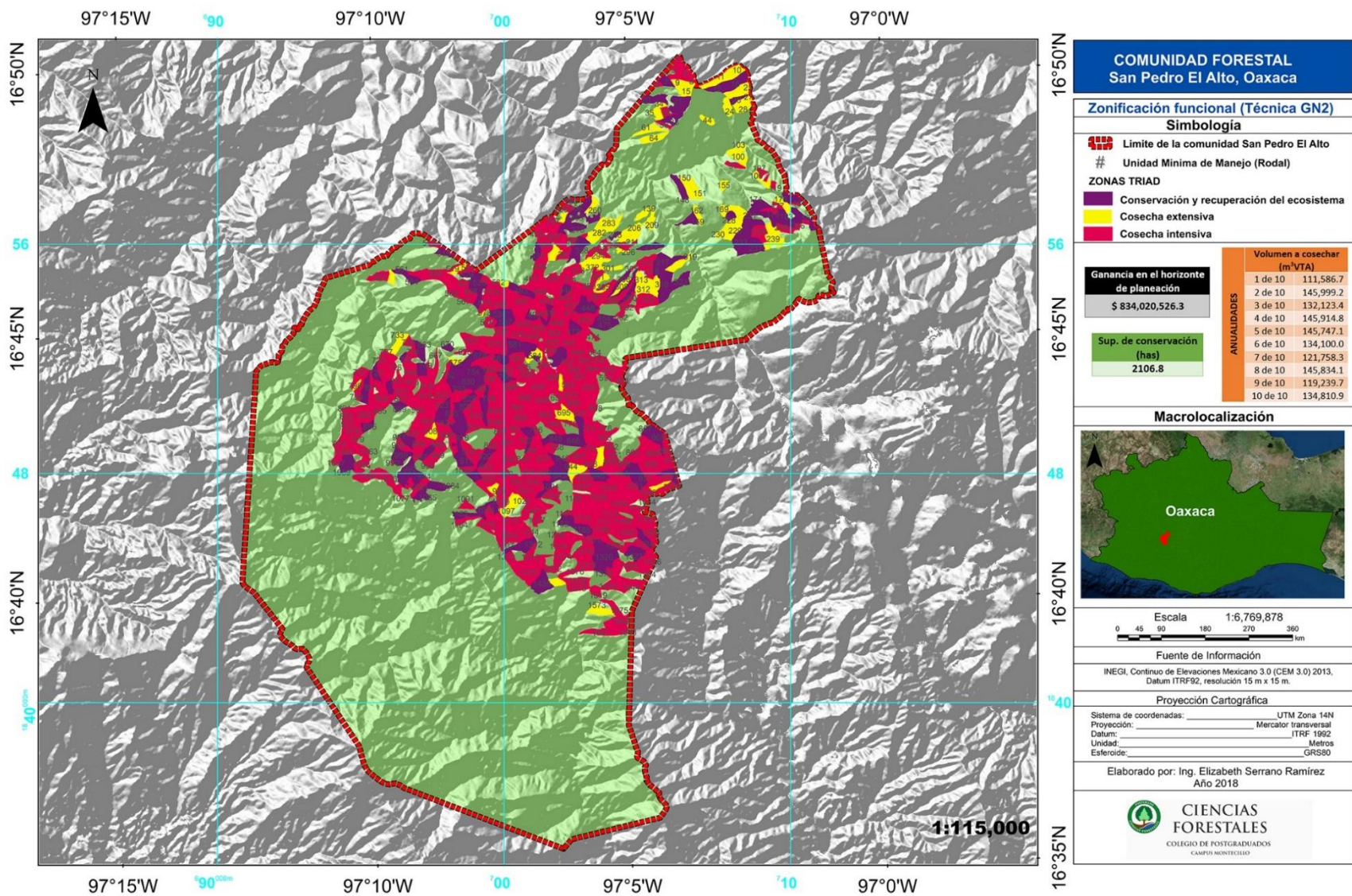


Figura 3.26 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica GN2.

3.5.9 Algoritmo genético de mutación múltiple con elitismo (GN3)

Los resultados obtenidos por la técnica de recocido simulado con búsqueda local simple estimaron un ingreso promedio en el horizonte de planeación de \$805.4 millones de pesos. La mejor solución obtenida por esta técnica estimó un ingreso de \$836.2 millones de pesos y la peor solución \$787.7 millones de pesos. El 50 % de las soluciones estiman un ingreso igual o menor que \$802.9 millones de pesos y en promedio, el ingreso económico se desvía de la media aproximadamente \$ 11.9 millones de pesos (Cuadro 3.17).

Cuadro 3.17 Resumen de estadísticos para los resultados de la técnica GN3.

Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Q ₁	Q ₃	Desviación estándar
805.4	802.9	787.7	836.2	800.3	808.0	11.9

La mejor solución encontrada (\$836.2 millones de pesos) asignó 2227.15 ha a la zona de conservación, 817.64 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5381.89 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.28). Los tratamientos silvícolas especificados para la zona de aprovechamiento extensivo fueron 1° cosecha comercial para 237.18 ha, 2° cosecha comercial para 417.50 ha y 3° cosecha comercial para 162.96 ha; y para la zona de aprovechamiento intensivo fueron aclareo comercial ligero para 984.53 ha, aclareo comercial normal para 3727.24 ha y corta de regeneración para 670.12 ha (Anexo 9).

El intervalo predominante para la intensidad de corta en el horizonte de planeación corresponde al 60-75 % del volumen existente en el rodal, con un aprovechamiento promedio de 182.42 m³ por ha (Anexo 18) y aproximadamente se intervienen 44 rodales por periodo (Anexo 27). De acuerdo a los tratamientos silvícolas prescritos, se calculó obtener 161 606.28 m³ para productos primarios, 701 830.49 m³ para productos secundarios y 456 956.14 m³ para celulósicos y otros (Cuadro 3.18). El flujo de volumen de cosecha se mantuvo por debajo de la meta (150 000 m³ anuales), con un promedio de 149 978.22 m³ anuales al inicio y final del horizonte de planeación (años 1, 2, 3, 9 y 10), mientras que en los años intermedios (años 4, 5, 6, 7 y 8) el flujo de volumen de cosecha fue en promedio de 146 935.81 (Figura 3.27).

Cuadro 3.18 Volumen para cosecha por tipo de producto estimado por la técnica GN3.

Año	m ³ VTA		
	Primarios	Secundarios	Celulósicos y otros
1	2297.05	73 076.90	48 608.55
2	3011.22	67 629.29	44 942.80
3	11 081.21	66 616.10	43 883.05
4	13 424.89	80 518.83	53 039.94
5	13 979.71	81 544.95	53 697.60
6	17 212.85	80 102.83	52 582.23
7	32 688.20	68 747.73	44 275.23
8	17 004.92	76 001.30	49 857.77
9	11 656.64	61 135.08	40 201.64
10	39 249.53	46 457.44	25 867.29
Total	161 606.28	701 830.49	456 956.14

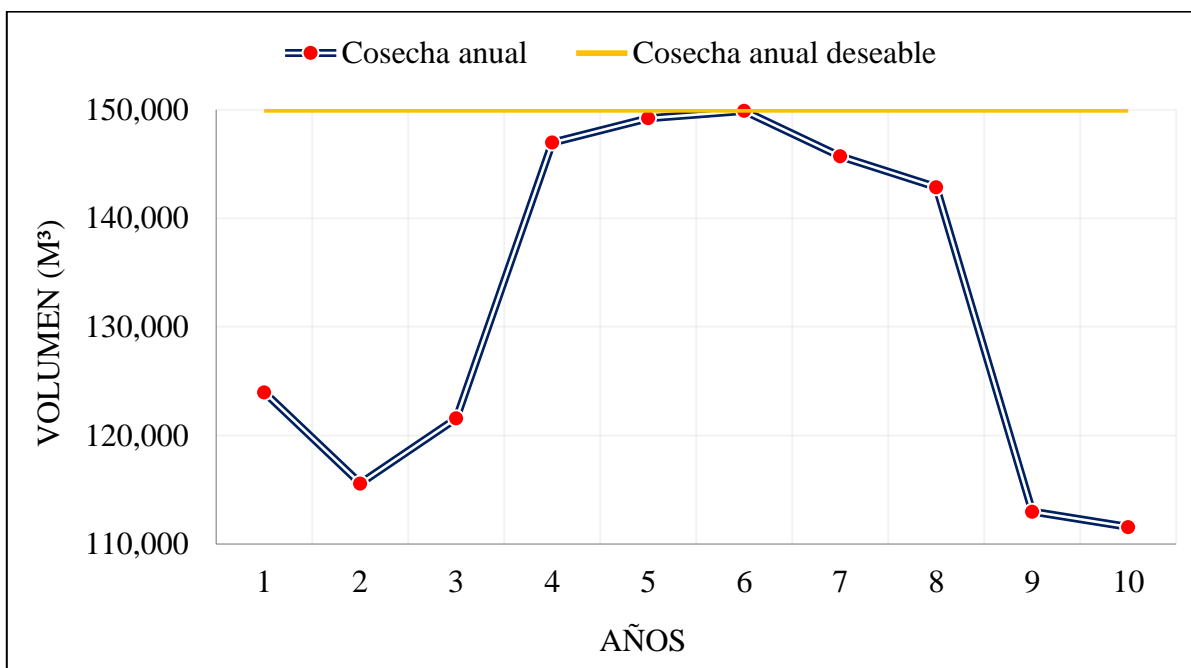


Figura 3.27 Volumen de cosecha en el horizonte de planeación estimado por la técnica GN3.

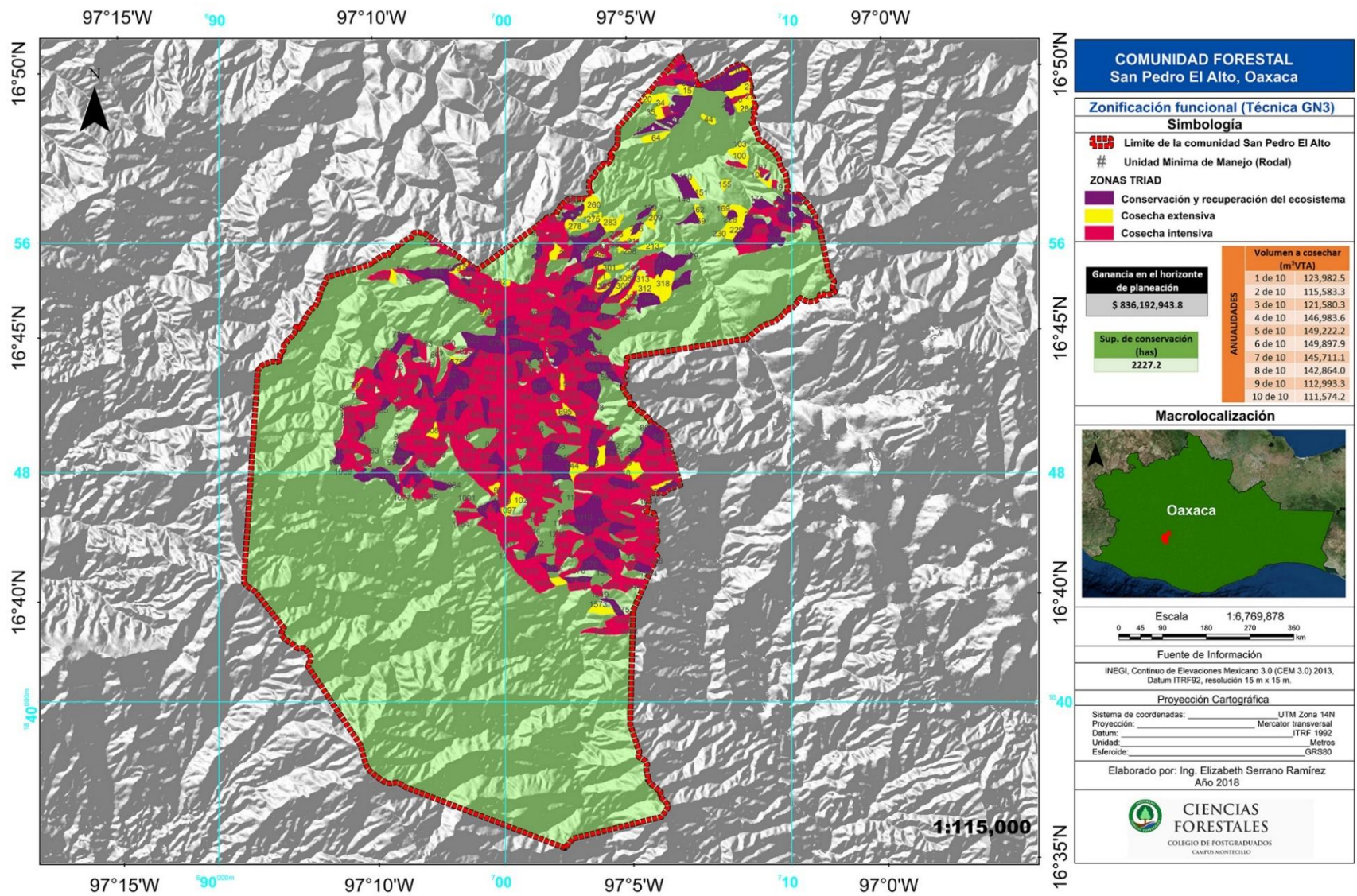


Figura 3.28 Propuesta para la distribución de zonas TRIAD de la mejor solución obtenida por la técnica GN3.

3.5.10 Comparación entre heurísticas

Los resultados de la optimización se compararon en términos del valor de la función objetivo, error relativo y tiempo computacional de cada una de las técnicas utilizadas. En la Figura 3.29 se muestra la dispersión de los valores obtenidos en términos del ingreso monetario total en el horizonte de planeación, en donde la técnica híbrida de recocido simulado con búsqueda local simple (RBLs) presentó el máximo ingreso, mientras que la técnica híbrida de recocido simulado con multiarranque (RMTA) obtuvo el valor más bajo. La técnica de búsqueda local (BLS) estimó los valores de la función objetivo con mayor variación, comparada con los valores obtenidos por las técnicas RBLs, RMTA y el algoritmo genético en su versión simple (GNS), que son bastante consistentes.

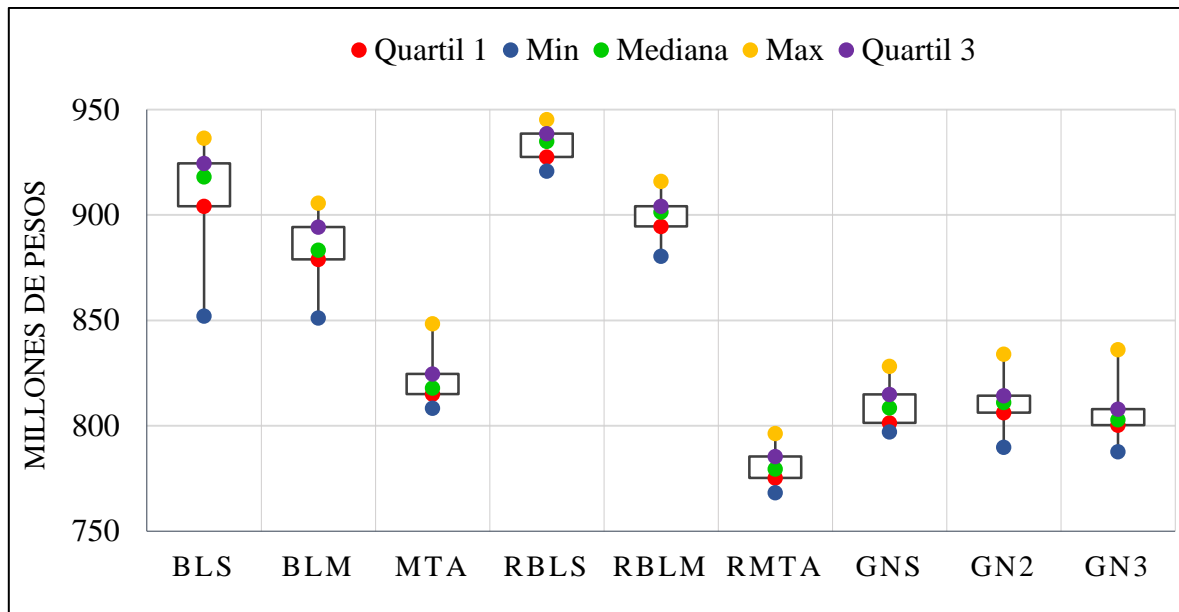


Figura 3.29 Diagrama de cajas y bigotes de los ingresos obtenidos en el horizonte de planeación.

Para evaluar la calidad (capacidad de obtener una solución cercana al óptimo) de las técnicas utilizadas y la confiabilidad de los resultados obtenidos, se estimó el error estadístico en los intervalos de confianza para las soluciones obtenidas mediante la prueba de medianas de Bootstrap. Las diferencias en el desempeño de las técnicas utilizadas se determinaron mediante la prueba de signos de Wilcoxon. De acuerdo con el Cuadro 3.19, los valores obtenidos de la mediana poblacional por las técnicas MTA, GNS, GN2 y GN3, se encuentran

en el rango de \$800-\$824 millones de pesos; mientras que el valor de la mediana obtenido por la técnica RMLTA se encuentra en un rango de \$770-785 millones de pesos. Para el caso de las técnicas BLS y RBLS, el margen de error de la mediana poblacional oscila en un rango de \$900-\$937 millones de pesos y para la técnica BLM en un rango de \$870-\$892 millones de pesos. Se optó por estimar la mediana, en lugar del promedio, pues el valor de la media suele ser influenciado por valores separados del resto de los valores obtenidos (más altos o más bajos), mientras que la mediana es una métrica más precisa para muestras pequeñas, como es el caso en particular.

Cuadro 3.19 Resumen de la prueba de medianas de Bootstrap (millones de pesos).

Confiabilidad de 95 %									
	BLS	BLM	MLTA	RBLS	RBLM	RMLTA	GNS	GN2	GN3
Límite superior	923.6	891.6	823.4	936.8	903.4	784.3	812.9	813.3	806.2
Límite inferior	908.1	879.4	815.6	928.2	896.5	779.2	801.8	810.1	801.1

Para el caso de estudio, no se conoce la solución óptima al problema planteado, ya que es complicado encontrar el óptimo en un tiempo razonable utilizando un método exacto, sobre todo cuando el problema abordado es grande y de naturaleza no lineal como es el caso particular. Por lo tanto, se consideró al mejor valor conocido como punto de referencia, el cual corresponde a un ingreso total de \$1000.2 millones de pesos. Este valor se estimó considerando los volúmenes anuales de cosecha, especificados en el Programa de Manejo Forestal (PMF) vigente elaborado por los administradores forestales de San Pedro El Alto, los tratamientos silvícolas, distribución de productos y precios definidos en el modelo descrito en el Capítulo 2.

En el Cuadro 3.20 se muestra el mejor valor encontrado, correspondiente a \$945.2 millones de pesos, obtenido por la técnica RBLS, mientras que el peor valor encontrado corresponde a \$768.3 millones de pesos, obtenido por la técnica RMTA. En cuanto al tiempo de ejecución, las técnicas BLS, BLM, MTA y RBLS obtuvieron una solución en 30 minutos

aproximadamente, mientras que la técnica RBLM requirió cerca de 50 minutos para obtener una solución. Rönnqvist (2003), menciona que para resolver un problema de planificación forestal, el tiempo computacional requerido puede ser de una hora o más, pero como se muestra en el Cuadro 3.20, todas las técnicas fueron capaces de mejorar dicha estimación.

Cuadro 3.20 Valores obtenidos (millones de pesos) del proceso de experimentación.

	Mejor valor conocido	Mejor solución obtenida	Promedio de las soluciones obtenidas	Peor solución obtenida	Tiempo de ejecución (s)	Tiempo de ejecución (h)
BLS		936.5	912.1	852.1	1807	0.5
BLM		905.7	883.1	843.8	1766	0.5
MTA		848.4	820.6	808.4	2173	0.5
RBLS	1000.2	945.2	933.8	920.8	1907	0.5
RBLM		796.4	899.5	880.5	2880	0.8
RMTA		796.4	780.6	768.3	2007	0.6
GNS		828.2	808.9	797.1	2267	0.6
GN2		834.0	810.9	789.9	2625	0.7
GN3		836.2	805.4	787.7	2346	0.7

La eficiencia de las técnicas utilizadas se determinó mediante el error relativo promedio (E) de los valores obtenidos para la función objetivo (ingresos) con respecto al mejor valor conocido (\$1000.2 millones de pesos) [Ec. 3.1].

$$E = \frac{V_h \cdot V_o}{V_o} \cdot 100 \quad [Ec. 3.1]$$

donde

V_h : valor de la solución obtenida por la técnica heurística

V_o : mejor valor conocido

La desviación porcentual de las soluciones obtenidas (ingresos) con respecto al mejor valor conocido, para la mayoría de las técnicas, es inferior al 15%, siendo la técnica RMTA la que presenta el error relativo más grande del 22% (Cuadro 3.21). Aunque todas las soluciones están por debajo del ingreso total estimado por la mejor solución conocida, al menos la técnica RBLS pudo mejorar el proceso de optimización para obtener una solución más cercana a los \$1000.2 millones de pesos.

Cuadro 3.21 Desviación de las soluciones obtenidas frente a la mejor solución conocida.

	BLS	BLM	MTA	RBLS	RBLM	RMTA	GNS	GN2	GN3
Error relativo	8.49	11.82	18.07	6.77	10.19	22.06	19.24	19.03	19.59

Es importante evaluar el rendimiento de las diferentes técnicas utilizadas para resolver un problema específico y, para ello, se pueden utilizar diferentes procedimientos como la comparación de soluciones obtenidas con la solución óptima, con la solución más conocida, o con soluciones de otras heurísticas, etc. (Márquez, 2014). Para realizar las comparaciones entre heurísticas se utilizó la prueba no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon, debido a que los valores obtenidos por algunas de las técnicas implementadas no siguen una distribución normal (Gaussiana) (Anexos 28-36). Además, si se cuenta con un amaño de muestra pequeño, 20 datos por técnica en el caso particular, la eficiencia relativa de esta prueba es alta (Sainani, 2012). De acuerdo con esta prueba, si el valor obtenido en la prueba es menor que el valor crítico (52 en este caso), se rechaza la hipótesis nula (H_0) y podemos asumir que el rendimiento entre las heurísticas es significativamente diferente.

El Cuadro 3.22 muestra las 36 comparaciones realizadas entre las 9 técnicas heurísticas implementadas. A excepción de las comparaciones entre los algoritmos genéticos, que presentan valores de la prueba mayores que el valor crítico, y por tanto no existe una diferencia significativa en el desempeño de estos; en las demás comparaciones realizadas se rechazó la hipótesis nula, indicando que las demás técnicas utilizadas presentan diferencias significativas en su desempeño para resolver el problema definido.

Cuadro 3.22 Resumen de las pruebas de rangos con signo de Wilcoxon.

Confiabilidad de 95 %									
TÉCNICAS	valor de la prueba								
	BLS	BLM	MLTA	RBLS	RBLM	RMLTA	GNS	GN2	GN3
BLS	-	21	0	1	33	0	0	0	0
BLM		-	0	0	22	0	0	0	0
MLTA			-	0	0	0	24	20	12
				RBLS		-	0	0	0
					RBLM		-	0	0
						RMLTA		-	0
							GNS		-
									86
									74
									52

Los resultados obtenidos coinciden con la teoría propuesta por Martin (1996) y Pukkala y Kurttila (2005), quienes mencionan que las técnicas conformadas por diferentes heurísticas trabajan mejor que una sola técnica en su versión original. Parte de la ventaja de la técnica RBLS se debe a la alta eficiencia que presenta la técnica de recocido simulado para resolver problemas de zonificación que involucran una estructura no lineal y optimización multiobjetivo (Kong *et al.*, 2012).

Respecto a las demás técnicas, en un estudio similar, López *et al.* (2014) mencionan que la técnica de multiarranque resultó ser considerablemente rápida. Lo anterior coincide con los resultados obtenidos en este trabajo, donde la segunda técnica con el mejor desempeño es la técnica de multiarranque (MTA). A pesar de que la técnica de búsqueda local simple (BLS) obtuvo el segundo valor mejor encontrado, la técnica MTA requiere un tiempo computacional menor y muestra una estabilidad considerable en los valores obtenidos para la función objetivo. Para el problema planteado, la comparación del tiempo computacional requerido entre la mejor solución conocida y la mejor obtenida, no puede realizarse de manera precisa, pues no se conoce la solución óptima al mismo; pero si existe una diferencia marcada entre la eficiencia de las técnicas utilizadas que resuelven el modelo en aproximadamente 40 min y el tiempo invertido por la comunidad para obtener la mejor solución conocida, siendo este un promedio de 3 meses.

En comparación con el esquema actual de manejo en San Pedro El Alto, que define un aprovechamiento intensivo (de acuerdo con la propuesta de zonificación) en las 8437 ha consideradas en el PMF vigente, la mejor solución obtenida por la técnica RBLS asigna 1354.27 ha a la zona de conservación, 1564.63 ha a la zona de aprovechamiento extensivo y 5507.78 ha a la zona de aprovechamiento intensivo (Figura 3.30).

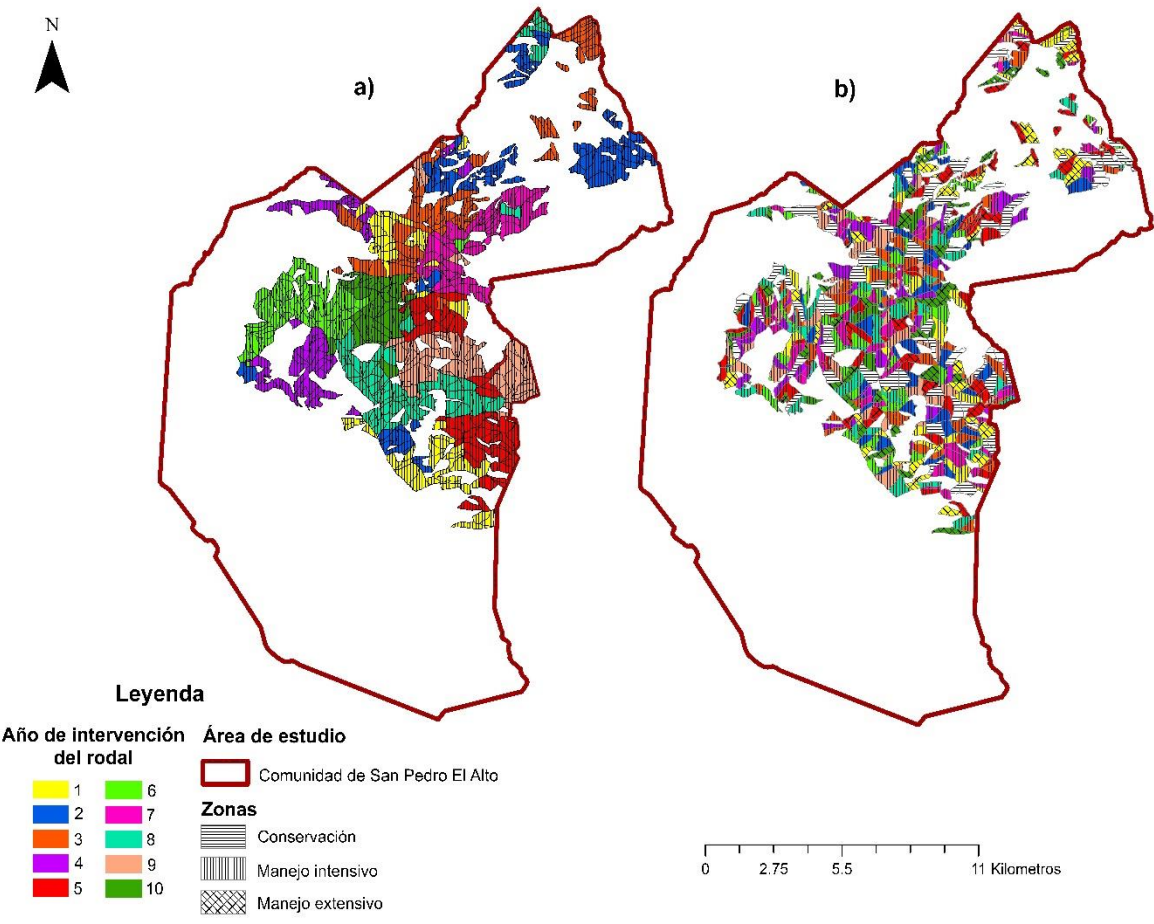


Figura 3.30 Distribución de las anualidades de cosecha y zonas TRIAD para a) escenario actual del PMF vigente de San Pedro El Alto, b) mejor solución obtenida por la técnica RBLS.

A pesar de que el ingreso estimado por la técnica de recocido simulado con búsqueda local simple (RBLs) es 5.5 % menor al ingreso estimado por el escenario actual de manejo en la comunidad de San Pedro El Alto, es importante destacar que, comparada con la solución del programa de manejo, se están segregando de aprovechamiento silvícola 1354.27 ha, las cuales están destinadas a conservación mientras que el PMF vigente contempla destinarlas para cosecha. Tal aprovechamiento estima un ingreso de \$156 millones de pesos que, si se adiciona al ingreso obtenido por la técnica RBLs (\$945.2 millones de pesos), fácilmente se supera la mejor solución conocida. No excluir dicha superficie implicaría un ingreso anual promedio de \$11,519.61 /ha comparado con \$1000/ha que se han definido como ingreso potencial para áreas en conservación. Lo anterior es congruente con Mönkkönen *et al.* (2014), quienes mencionan que las acciones de conservación, a menudo, restringen otras actividades productivas y generan costos que deben descontarse del ingreso total estimado en el horizonte de planeación.

Es importante mencionar que aunque el enfoque de zonificación TRIAD representa una alternativa para asignar áreas del territorio a objetivos de producción diferentes o a conservación, además de definir estrategias de manejo independientes con propósito de mantener o aumentar los volúmenes de madera a cosechar, y al mismo tiempo reducir el impacto sobre el ecosistema; este no permite definir un estándar respecto a la superficie ideal a asignar en cada zona.

La asignación del territorio a una u otra zona estará definida por la calidad y cantidad de beneficios obtenidos en cada una, así como por el conjunto de objetivos de gestión determinados por los poseedores o propietarios de los recursos forestales. Sin embargo, el enfoque TRIAD aquí implementado es capaz de ofrecer, de manera eficiente, escenarios de manejo forestal suficientemente buenos para su consideración en la práctica; muchos de ellos mejores a los que se podrían obtener por ensayo y error mediante procedimientos tradicionales. Lo anterior permite a la comunidad de San Pedro El Alto analizar las alternativas generadas y seleccionar la mejor para ejercer un uso eficiente de sus recursos forestales.

Idealmente este tipo de planificación debe realizarse para masas forestales que aún no están sujetas a un plan de manejo y de las cuales se pretende obtener múltiples productos como madera y productos forestales no maderables, así como mantener la biodiversidad y otros servicios que proveen los ecosistemas forestales.

3.6 Conclusiones

Conforme a lo esperado, la técnica de recocido simulado con búsqueda local simple (RBLS) presentó el mejor rendimiento para obtener soluciones factibles que maximizan el valor de la función objetivo. La combinación de las dos técnicas heurísticas incluidas en la técnica RBLS proporciona una mejora robusta en la resolución de una instancia de gran tamaño, como fue el caso del estudio, probablemente debido a que la técnica de recocido simulado es un método heurístico eficiente para resolver modelos de optimización que involucran una estructura de tipo no lineal.

El bajo rendimiento presentado por técnicas heurísticas basadas solo en búsquedas locales puede atribuirse a los criterios definidos para la exploración de vecindarios en el espacio de búsqueda, sin embargo, debemos tener en cuenta que el rendimiento de la heurística puede variar según la complejidad del problema y la coherencia de los parámetros especificados. Cuando se abordan problemas de planeación forestal de gran tamaño, que además incluyen restricciones espaciales de zonificación, como es el caso particular, los métodos exactos no permiten obtener una solución óptima de forma eficiente, por lo cual se debe recurrir al uso de técnicas heurísticas que permitan obtener una buena solución en un tiempo computacional razonable.

El algoritmo implementado para poner en operación la técnica RBLS constituye una herramienta valiosa para los gestores de recursos forestales dado que permite definir donde y cuando ejecutar las actividades silvícolas prescritas, con objeto de satisfacer una demanda de productos específica, y maximizar el rendimiento del bosque. Este puede ser replicado bajo diferentes escenarios de producción y condiciones del recurso forestal, equilibrando las demandas de la industria forestal con otros valores ecológicos como la conservación de la biodiversidad.

3.7 Literatura citada

- Acuna, M. 2017. Timber and biomass transport optimization: a review of planning issues, solution techniques and decision support tools. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38: 279-290.
- Akbulut, R., P. Bettinger, Z- Ucar, S. Obata, K. Boston and J. Siry. 2017. Spatial forest plan development using heuristic processes seeded with a relaxed linear programming solution. *Forest Science* 63: 518-528.
- Araújo J., C.A. Mendes, C.D. Cabacinha, A.L. de Assis, L.M. Alves M. and H. Garcia L. 2017. Meta-heuristic clonal selection algorithm for optimization of forest planning. *Revista Árvore* 41: 1-10.
- Augustynczyk, A.L.D., J.E. Arce, R. Yousefpour, and A.C.L. da Silva. 2016. Promoting harvesting stands connectivity and its economic implications in Brazilian forest plantations applying integer linear programming and simulated annealing. *Forest Policy and Economics* 73:120–129.
- Bettinger, P., J. Sessions and K. Boston. 1997. Using tabu search to schedule timber harvest subject to spatial wildlife goals for big game. *Ecological Modelling* 94: 111-123.
- Bettinger, P., M. Demirci and K. Boston. 2015. Search reversion within s-metaheuristics: impacts illustrated with a forest planning problem. *Silva Fennica* 49: 1-20.
- Bullard, S.H., H.D. Sherali and W.D. Klemperer. 1984. Estimating optimal thinning and rotation for mixed-species timber stands using a random search algorithm. *Forest Science* 31: 303–15.
- Boston, K. and P. Bettinger. 1999. An analysis of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems. *Forest Science* 45: 292-301.
- Dahlin, B. & Sallnäs, O. 1993. Harvest scheduling under adjacency constraints – a planning problem study from the Swedish sub-alpine region. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8: 281–290.
- Dong, L., P. Bettinger, H. Qin and Z. Liu. 2018. Reflections on the number of independent solutions for forest spatial harvest scheduling problems: a case of simulated annealing. *Silva Fennica* 52: 1-20.

- Falcao, A.O. & Borges, J. 2002. Combining random and systematic search heuristic procedures for solving spatially constrained forest management scheduling models. *Forest Science* 48(3): 608–621.
- Jin, X. T. Pukkala and F. Li. 2016. Fine-tuning Heuristic methods for combinatorial optimisation in forest planning. *European Journal of Forest Research* 735: 765-779.
- Kong, J., M. Rönnqvist and M. Frisk. 2012. Modeling an integrated market for sawlogs, pulpwood, and forest bioenergy. *Canadian Journal of Forest Research*. 42: 315–332.
- Lawrence, A. and A. Stewart. 2011. Sustainable forestry decisions: on the interface between technology and participation. *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resources Sciences* 3: 42-52.
- Lockwood, C. & Moore, T. 1993. Harvest scheduling with spatial constraints, a simulated annealing approach. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 468–478.
- López S., A.D., A.G. Hernández D., D. Vigo, R. Caballero and J. Molina. 2014. A multi-start algorithm for a balanced real-world open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*. 238: 104-113.
- Lu, F. and L.O. Eriksson. 2000. Formation of harvest units with genetic algorithms. *Forest Ecology and Management*. 130: 57-67.
- Márquez G., M. Las metaheurísticas: tendencias actuales y su aplicabilidad en la ergonomía. *Ingeniería Agroindustrial. Actualidad y Nuevas Tendencias* 4: 108-120.
- Martin, O.C. 1996. Combining simulated annealing with local search heuristics. *Annals of Operations Research* 63: 57-75.
- Mönkkönen, M., A. Juutinen, A. Mazziotta, K. Miettinen, D. Podkopaev, P. Reunanen, H. Salminen and O.P. Tikkanen. 2014. Spatially dynamic forest management to sustain biodiversity and economic returns. *Journal of Environmental Management* 134: 80-89.
- Murray, A.T., R.L. Church. 1995. Heuristic solution approaches to operational forest planning problems. *OR Spectrum* 17: 193–203.
- Nobre, S., L.O. Eriksson and R. Trubins. 2016. The use of decision support systems in forest management: analysis of FORSYS country reports. *Forests* 7: 1-18.
- Öhman, K. 2000. Creating continuous areas of old forest in long-term forest planning. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 715–724.

- Pukkala, T. and M. Kurttila. 2005. Examining the performance of six heuristic optimisation techniques in different forest planning problems. *Silva Fennica*. 39: 67-80.
- Rönnqvist, M. 2003. Optimization in forestry. *Mathematical Programming* 97: 267-284.
- Sainani, K.L. 2012. Dealing with non-normal data. *Archives of Physical Medical and Rehabilitation* 4: 1001-1005.
- Yao, J., X. Zhang and A.T. Murray. 2017. Spatial optimization for land-use allocation: accounting for sustainability concerns. *International Regional Science Review* 20: 1-22.
- Yoshimoto, A. and M. Konoshima. 2016. Spatially constrained harvest scheduling for multiple harvests by exact formulation with common matrix algebra. *Journal of Forestry Research* 21:15–22.
- Yoshimoto, A. and P. Asante. 2018. A new optimization model for spatially constrained harvest scheduling under area restrictions through maximum flow problem. *Forest Science* 64: 392-406.
- Zeng, H., T. Pukkala, H. Peltola and S. Kellomäki. 2007. Application of ant colony optimisation for the risk management of wind damage in forest planning. *Silva Fennica* 41: 315-332.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tendencias actuales del manejo forestal

La cuestión general del manejo forestal en cualquier contexto es “cuál es la asignación óptima de tratamientos silvícolas en el tiempo y espacio que resultarán en condiciones forestales capaces de proporcionar los valores buscados por el dueño del bosque”. Todo inicia con el establecimiento de los objetivos de manejo forestal, una tarea compleja que implica determinar los productos y servicios a obtener del bosque y especificar los criterios que permitirán medir el logro de las metas asociadas.

Los objetivos de la actividad forestal varían a diferentes escalas y cambian a través del tiempo, en función del contexto socioeconómico existente. Las metas de manejo requieren ser revisadas constantemente, considerando los valores sociales prevalecientes, el estado de la tecnología disponible y el nivel de desarrollo económico, así como las percepciones públicas de las condiciones ecológicas generales del bosque y el impacto potencial de los regímenes de manejo propuestos.

La zonificación funcional es una herramienta esencial para la planificación del manejo forestal de uso múltiple, delimita las funciones ecológicas, ambientales, sociales y de otro tipo para todas las áreas forestales bajo manejo, con la idea de equilibrar los objetivos, a veces divergentes, de la producción de madera, otras necesidades de la sociedad y la conservación de la naturaleza. A pesar de que diferentes opciones de zonificación son posibles, la zonificación TRIAD es un enfoque prometedor para acomodar los tres pilares de la sustentabilidad y tomar en cuenta todos los diferentes servicios ofrecidos por el bosque.

La zonificación TRIAD presenta un enfoque de administración de los recursos forestales para brindar beneficios ecológicos, económicos y sociales. Por un lado busca que los costos de extracción y transporte de productos maderables sean mínimos considerando la accesibilidad a las zonas de producción previamente definidas; por otro aseguran que la conservación de la biodiversidad a través del manejo el ecosistema y la definición explícita de zonas de reserva, socialmente, la cosecha de baja intensidad proporciona mejores oportunidades para

actividades de recreación y el uso de recursos no maderables mientras se provee de cierta cantidad de madera para el sector forestal y hábitat disponible para la fauna del bosque. Por lo tanto, esta estrategia considera que cuando las tres zonas son evaluadas como complementarias (como una sola unidad) existen muchos más beneficios a mayor escala.

En México, la gestión de los ecosistemas forestales presenta un gran desafío debido a las características de los ecosistemas forestales y la compleja red de interacciones del contexto que enmarca las actividades forestales en el país. De manera que, existe una necesidad de desarrollar alternativas para el manejo de los bosques productivos, superando la propuesta de protección estricta del bosque, pues existe evidencia de que los bosques gestionados para la producción de bienes y servicios pueden ser igual (si no es que mejores) de efectivos en la conservación de la cobertura forestal que aquellos que solo se manejan con el objetivo único de protección.

La Estrategia Nacional de Manejo Forestal Sustentable para el Incremento de la Producción y Productividad (ENAIPROS) establece entre sus prioridades una evaluación seria y sistemática de los efectos del manejo forestal en los bosques productivos del país, y promueve esquemas de soporte a comunidades y ejidos con el mejor potencial para incorporar sus tierras al manejo forestal sostenible.

Las empresas forestales comunitarias mexicanas, como la de San Pedro El Alto en Oaxaca, representan un caso único en el mundo, donde cientos de comunidades están manejando bosques de propiedad común para la producción comercial de madera y al mismo tiempo realizan acciones de conservación. A pesar del avance, se considera necesario fortalecer el cambio hacia la implementación de una gestión forestal sostenible que satisfaga las necesidades de los grupos sociales que viven de los productos forestales maderables y no maderables, así como las necesidades de la industria forestal y la economía regional y nacional.

Modelos de optimización para la asignación eficiente de recursos forestales

Los modelos de optimización se han utilizado con éxito para abordar problemas complejos de planificación espacial, incluida la gestión forestal. Estos conforman herramientas de modelización que ayudan a los administradores forestales a programar el aprovechamiento de los recursos a fin de guiarlos hacia un estado deseado que produzca los bienes y servicios que los dueños y la sociedad demandan. Si las condiciones del bosque bajo manejo pueden ser descritas y cuantificadas formalmente, utilizando variables y decisiones asociadas con momentos en el tiempo, entonces los métodos de optimización pueden ser de gran ayuda al proponer alternativas y cursos de acción que proveerán el máximo beneficio al propietario del recurso.

Aunque las técnicas de optimización han sido utilizadas desde tiempo atrás para optimizar las actividades silvícolas, sigue siendo un área donde se produce innovación al aplicar nuevos métodos para resolver problemas de gestión. Anteriormente, la mayoría de los modelos eran diseñados para maximizar las ganancias o minimizar el costo total de producción, asumiendo que estos eran los únicos enfoques relevantes. Hoy en día se consideran otros objetivos, como la conservación de la biodiversidad, que complementen las metas establecidas y cumplan con los requisitos operacionales y de políticas públicas.

Para que un modelo de optimización forestal logre el fin deseado, debe ser lo más simple posible e idealmente debe estar basado en los juicios y preferencias de los propietarios y administradores del bosque. El nivel de la complejidad requerido para proyectar los efectos de las posibles alternativas de gestión, obtenidas por el modelo, dependerá de la complejidad del ecosistema (número de variables, grado de no linealidad, etc.) y la complejidad espacial (tamaño del área de estudio, tamaño de celda de la cuadrícula, número de procesos de interacción espacial).

Considerando que no existe un modelo único y "mejor" para todos los fines, es deseable que el modelo seleccionado sea adecuado al problema de planificación planteado y que defina claramente que se está incluyendo en el modelo, que se puede deducir de los resultados a obtener y cuáles son los supuestos básicos del modelo. Tomar en cuenta lo anteriormente

mencionado, permitirá al modelo determinar cuándo, dónde y cómo aprovechar los recursos con uno o más objetivos de producción, considerando el potencial productivo del bosque y su biodiversidad asociada.

Técnicas heurísticas en la gestión forestal

Los métodos heurísticos son técnicas que utilizan la lógica y reglas generales de programación para obtener soluciones factibles y de alta calidad, que respondan a problemas de planificación de gran complejidad. Comúnmente en los procesos de planeación y, específicamente en la planificación forestal, existen relaciones funcionales complejas o de tipo no lineal que requieren ser incorporadas en las decisiones de manejo.

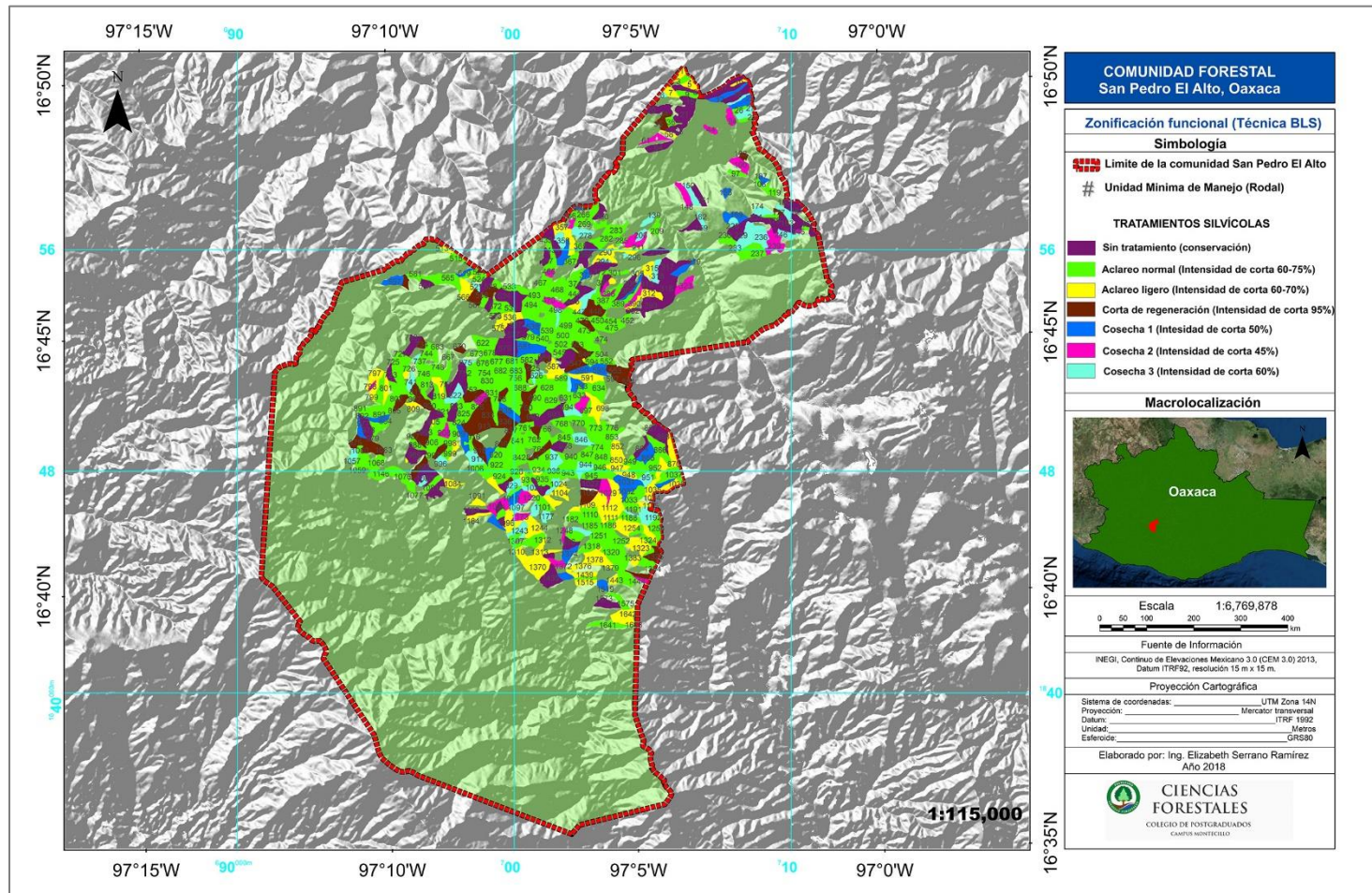
Una exploración heurística para una solución, ya sea que conduzca a una solución óptima comprobable o no, permite a un planificador forestal explorar una gama de soluciones a problemas complejos. Por lo que, una heurística puede ser vista como una herramienta para apoyar al tomador de decisiones a través de la rápida creación y visualización de una serie de escenarios de planificación. Lo anterior permite seleccionar aquella solución que defina la distribución eficiente de los recursos para mantener un flujo constante de bienes y servicios obtenidos del recurso forestal, y así obtener el máximo rendimiento económico y mejorar los aspectos ecológicos y sociales.

La diversidad estructural y funcional de las diferentes técnicas heurísticas aplicadas en el manejo de los recursos forestales permite generar soluciones ad hoc del problema que se esté optimizando, pero el rendimiento de la heurística puede variar según la complejidad del problema planteado y la racionalidad de los parámetros utilizados en su diseño. La complejidad del análisis computacional dependerá del tamaño del problema que se está resolviendo, el tipo de computadora que se utiliza y la cantidad de tiempo requerido para la generación de una solución. Por lo que, es tarea del programador seleccionar con cuidado los criterios y parámetros de cada heurística, ya que de su elección depende la calidad de las soluciones que se encuentren.

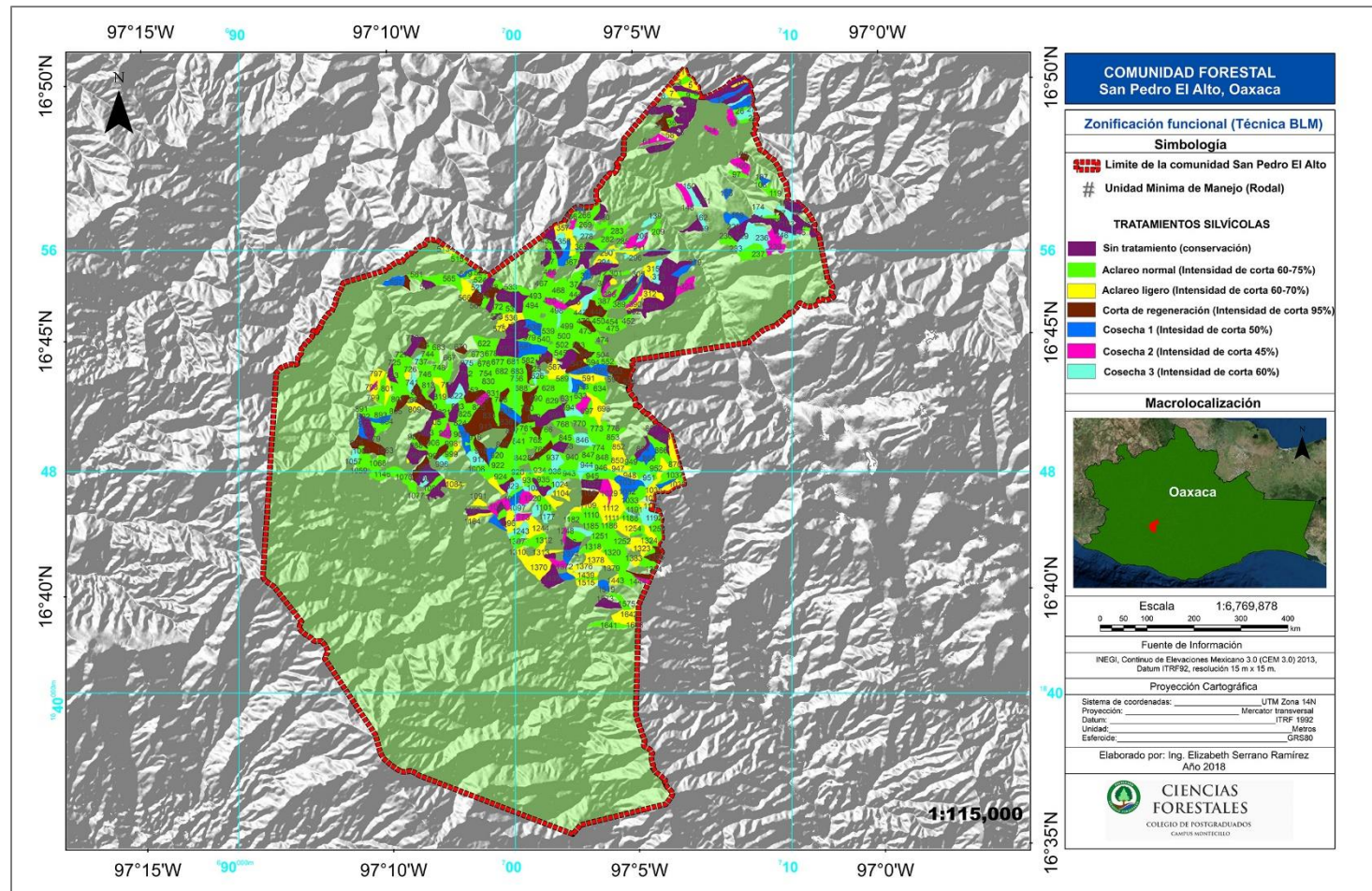
ANEXOS

Tratamientos silvícolas prescritos por rodal

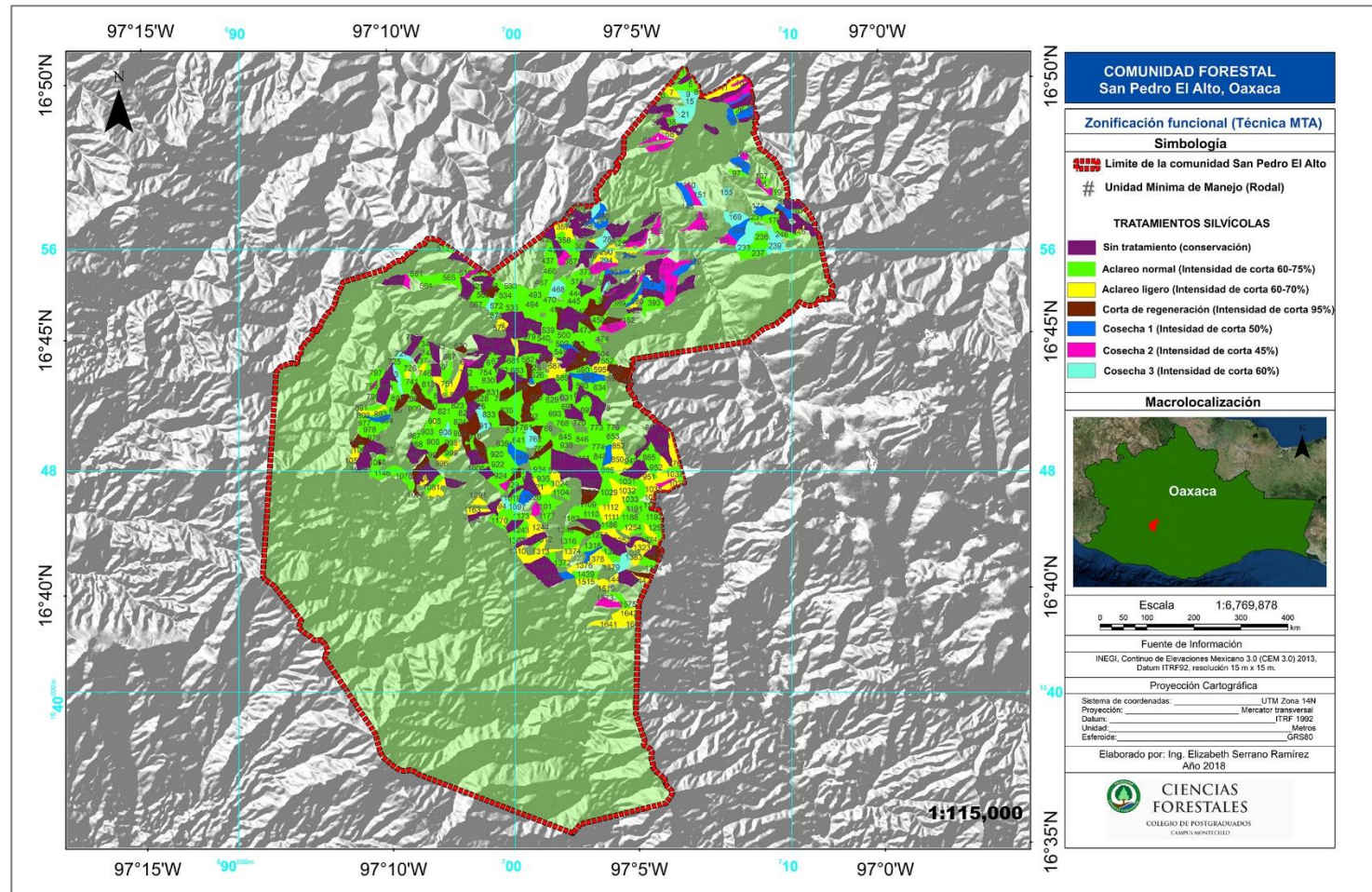
Anexo 1. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica BLS.



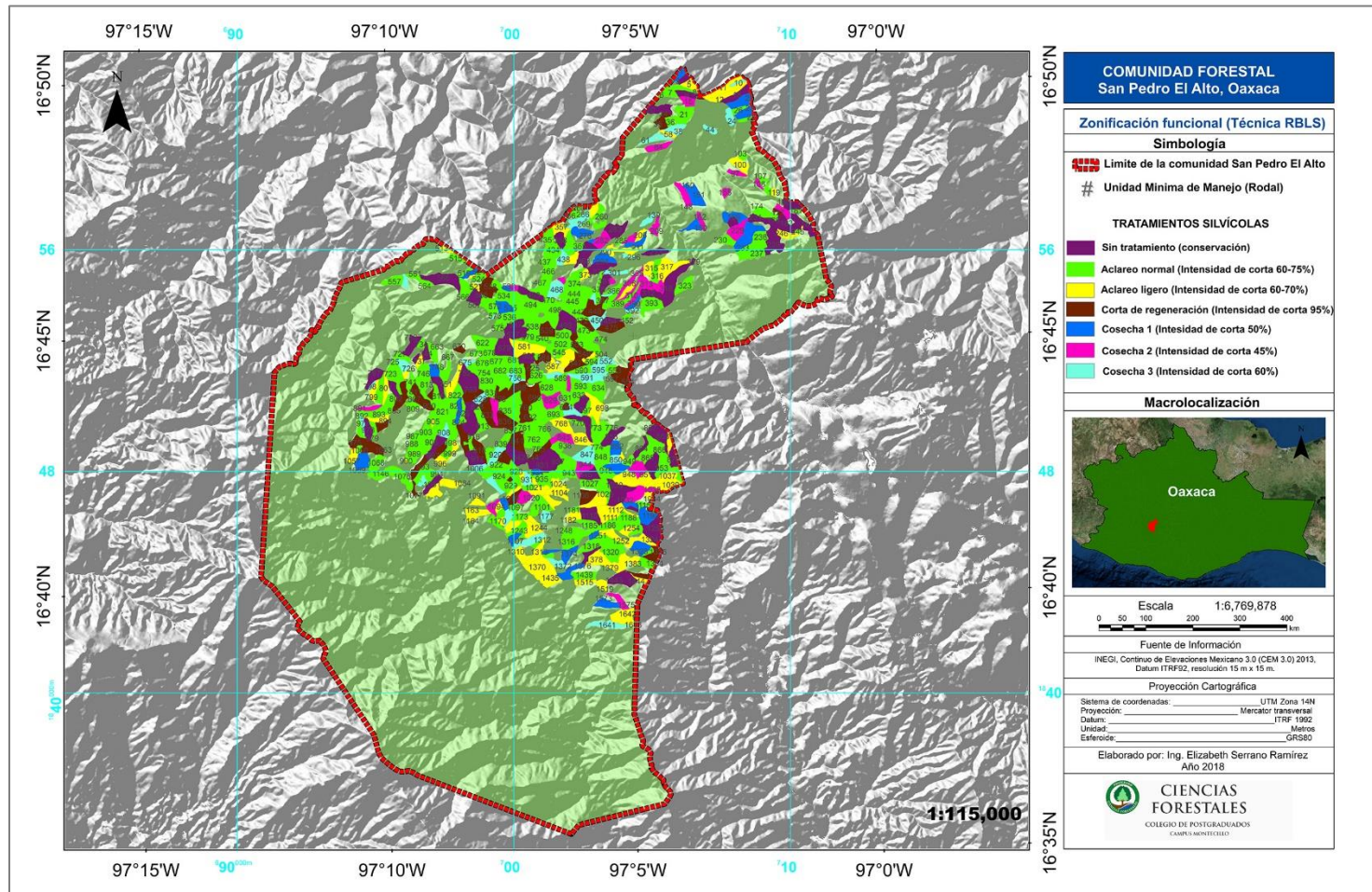
Anexo 2. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica BLM.



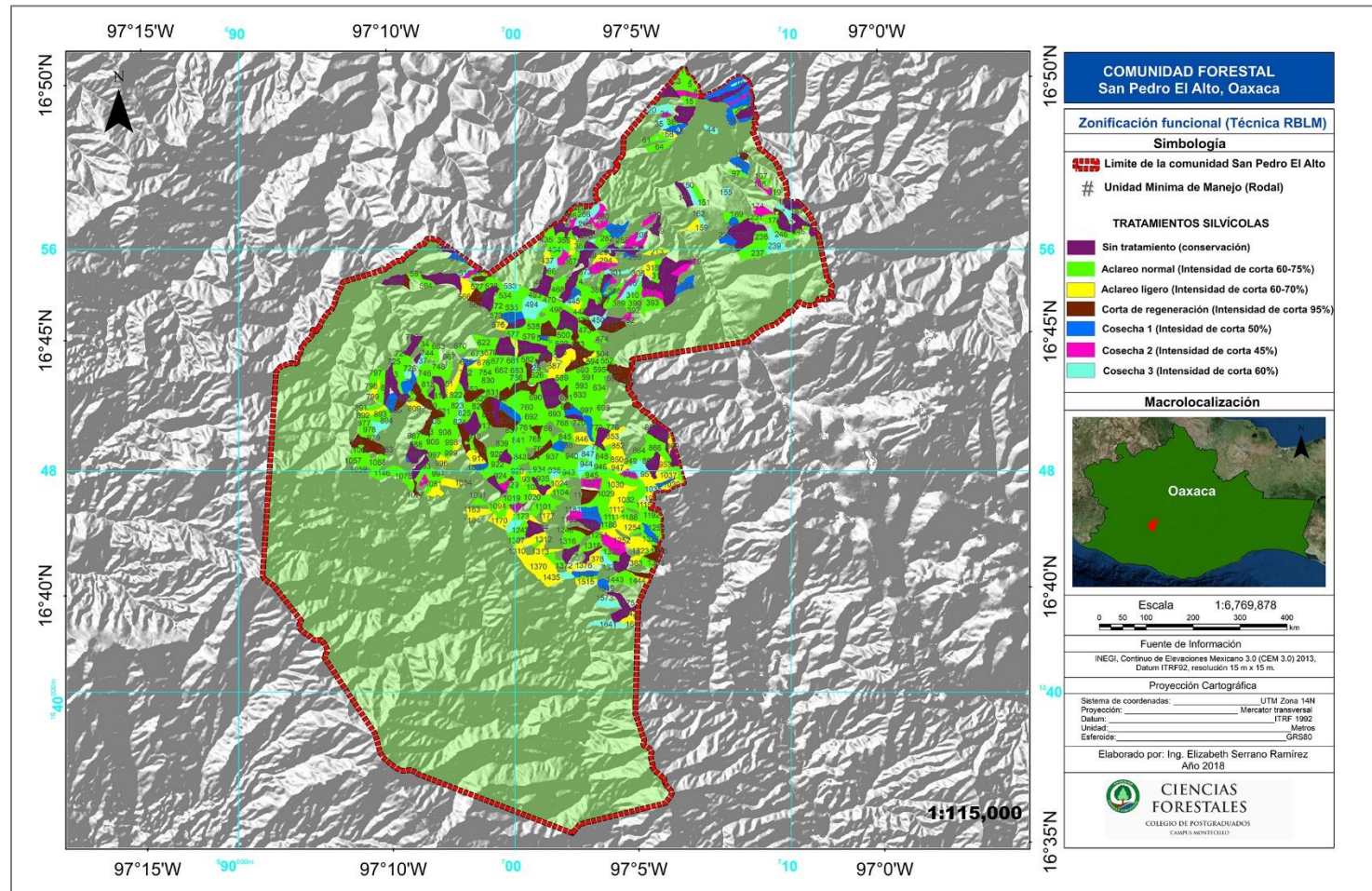
Anexo 3. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica MTA.



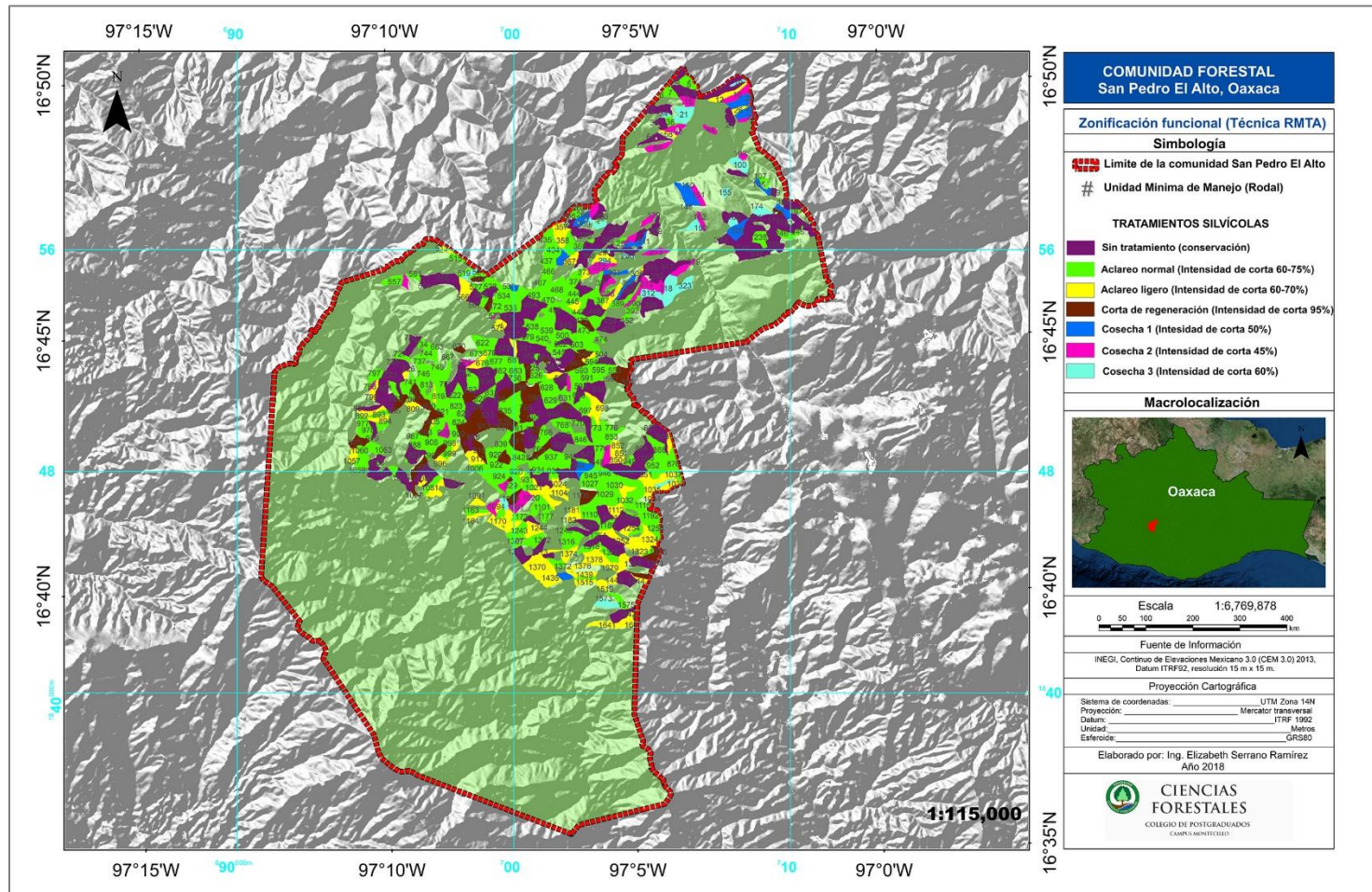
Anexo 4. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica RBLs.



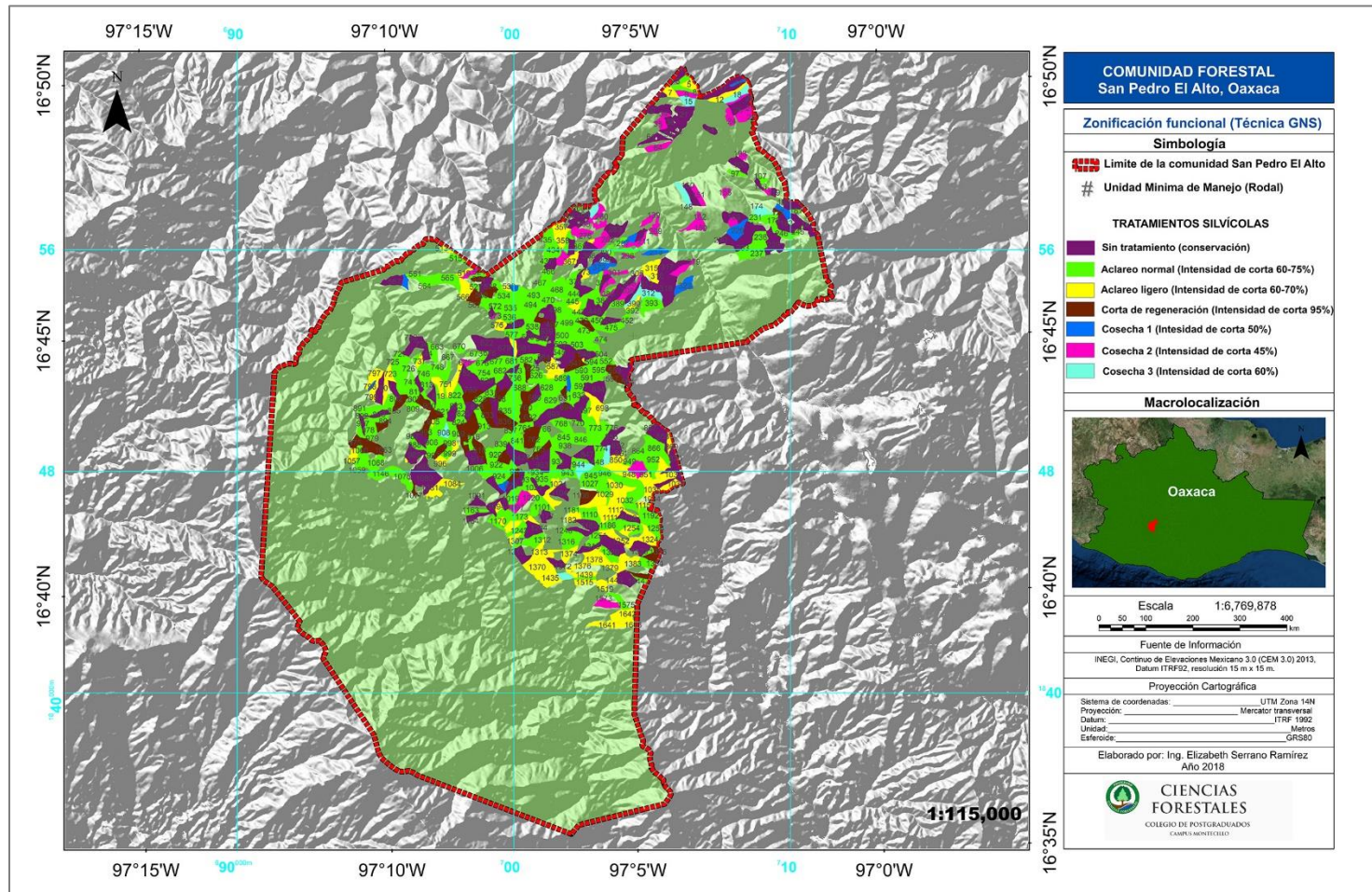
Anexo 5. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica RBLM.



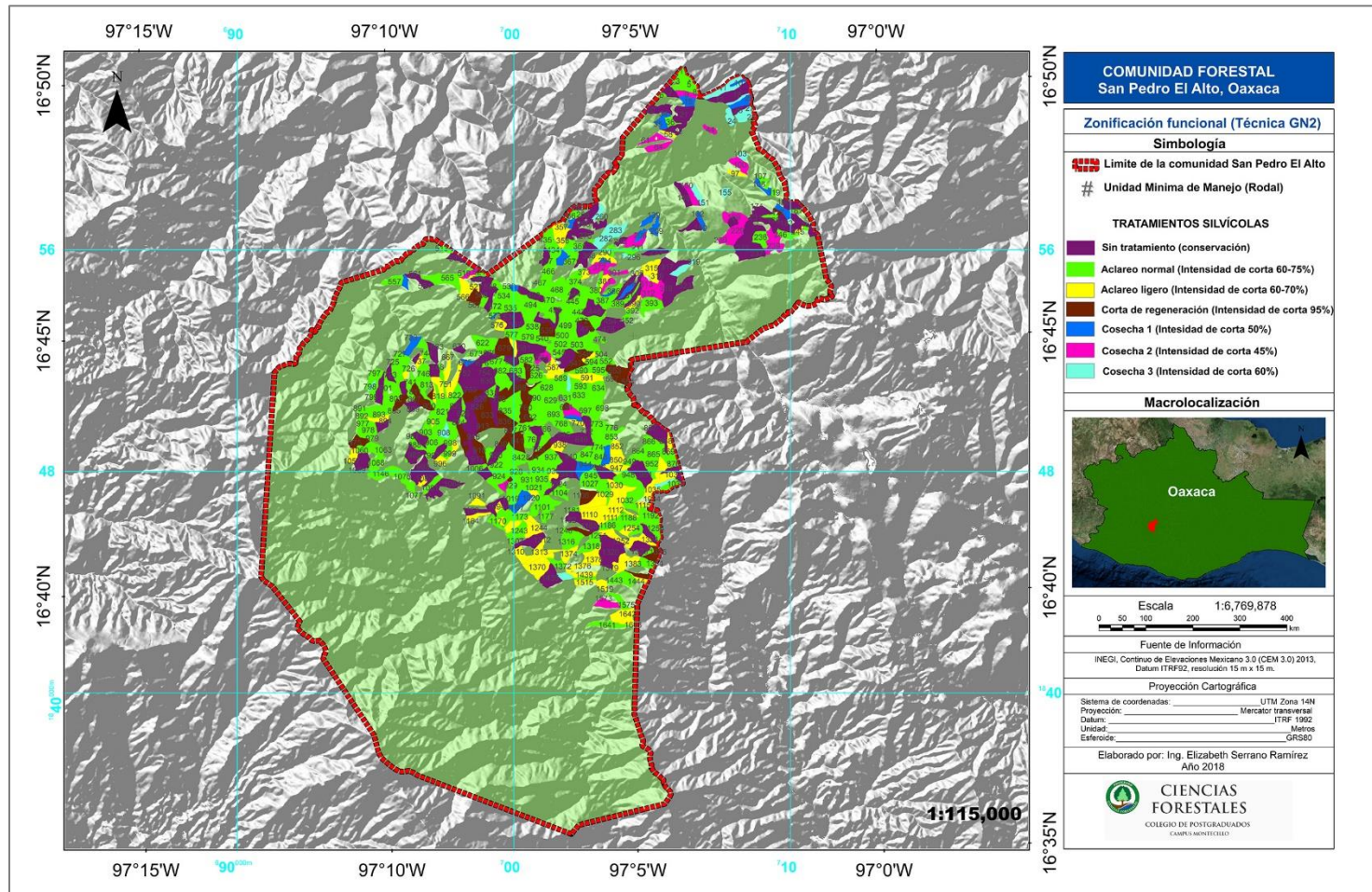
Anexo 6. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica RMTA.



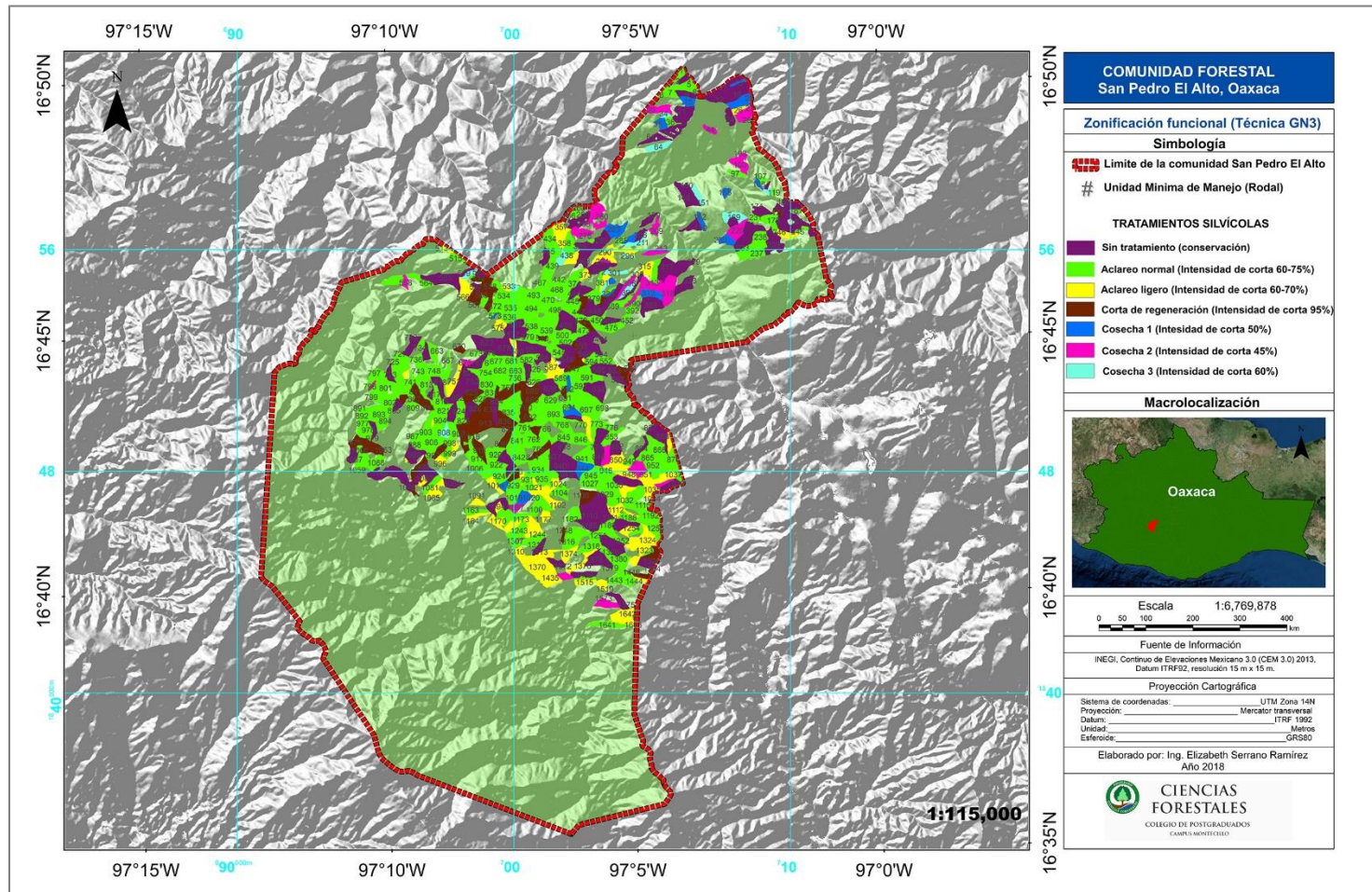
Anexo 7. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica GNS.



Anexo 8. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica GN2.

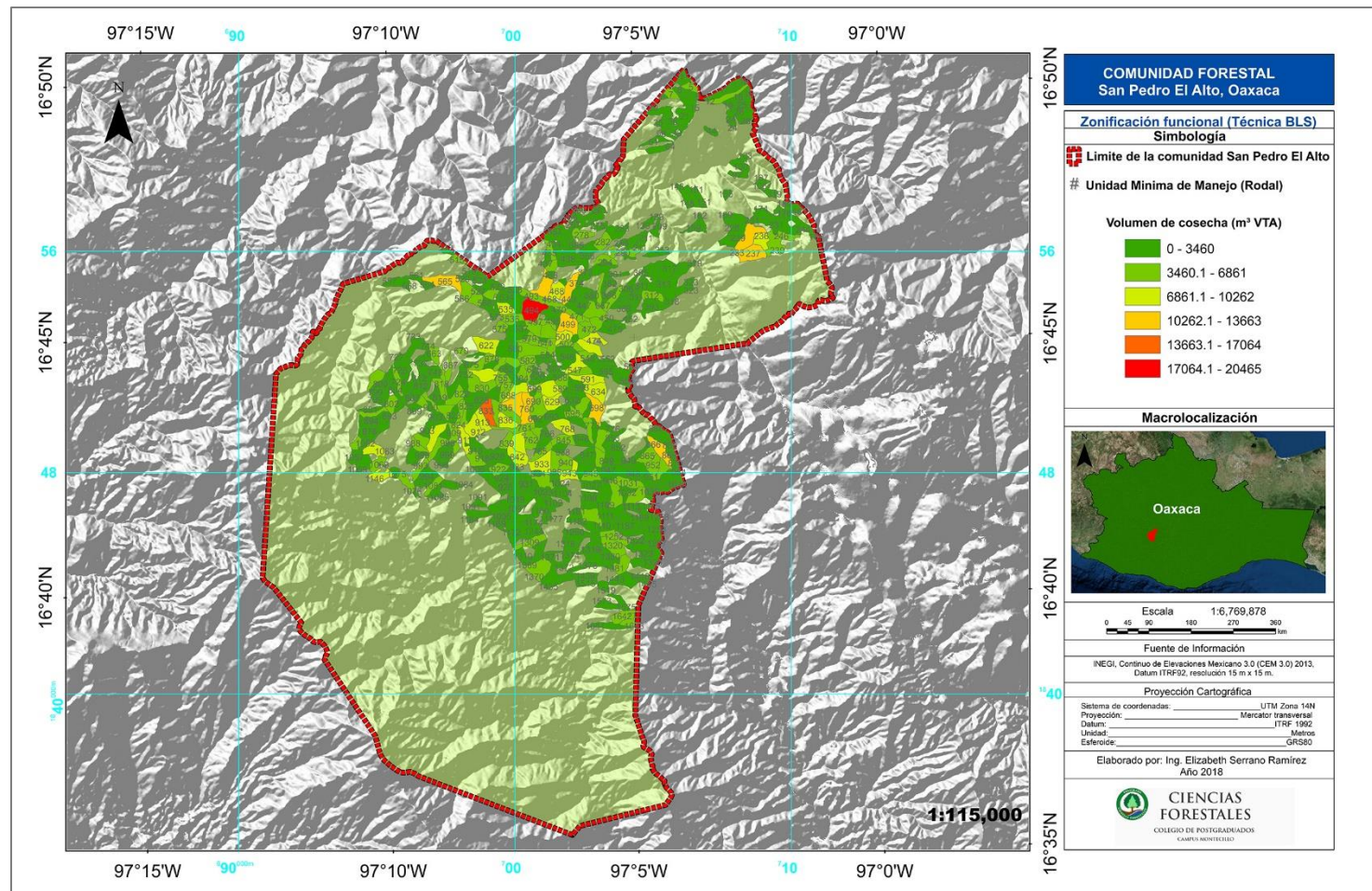


Anexo 9. Tratamientos silvícolas prescritos por la mejor solución encontrada por la técnica GN3.

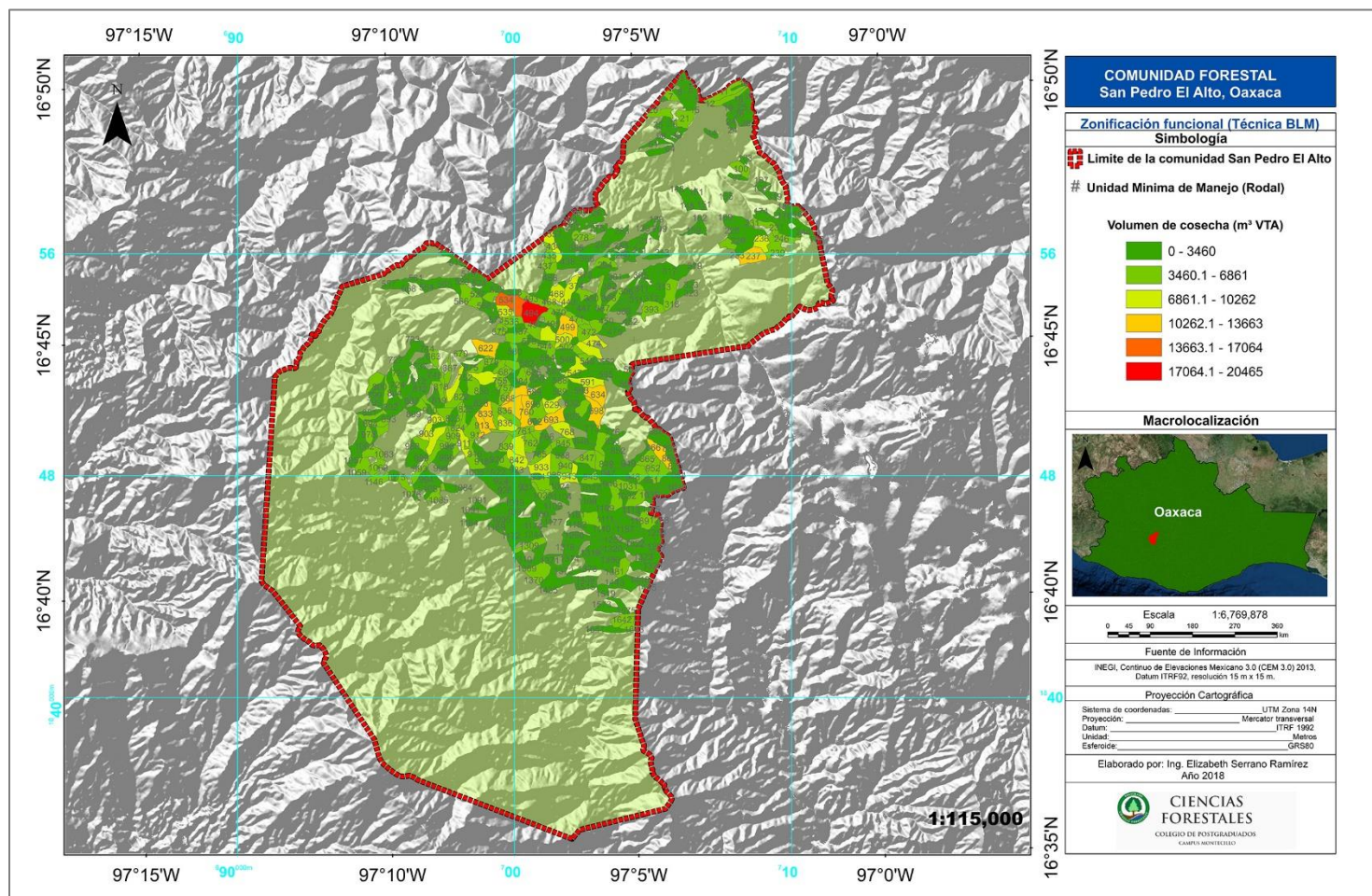


Volumen de cosecha por rodal

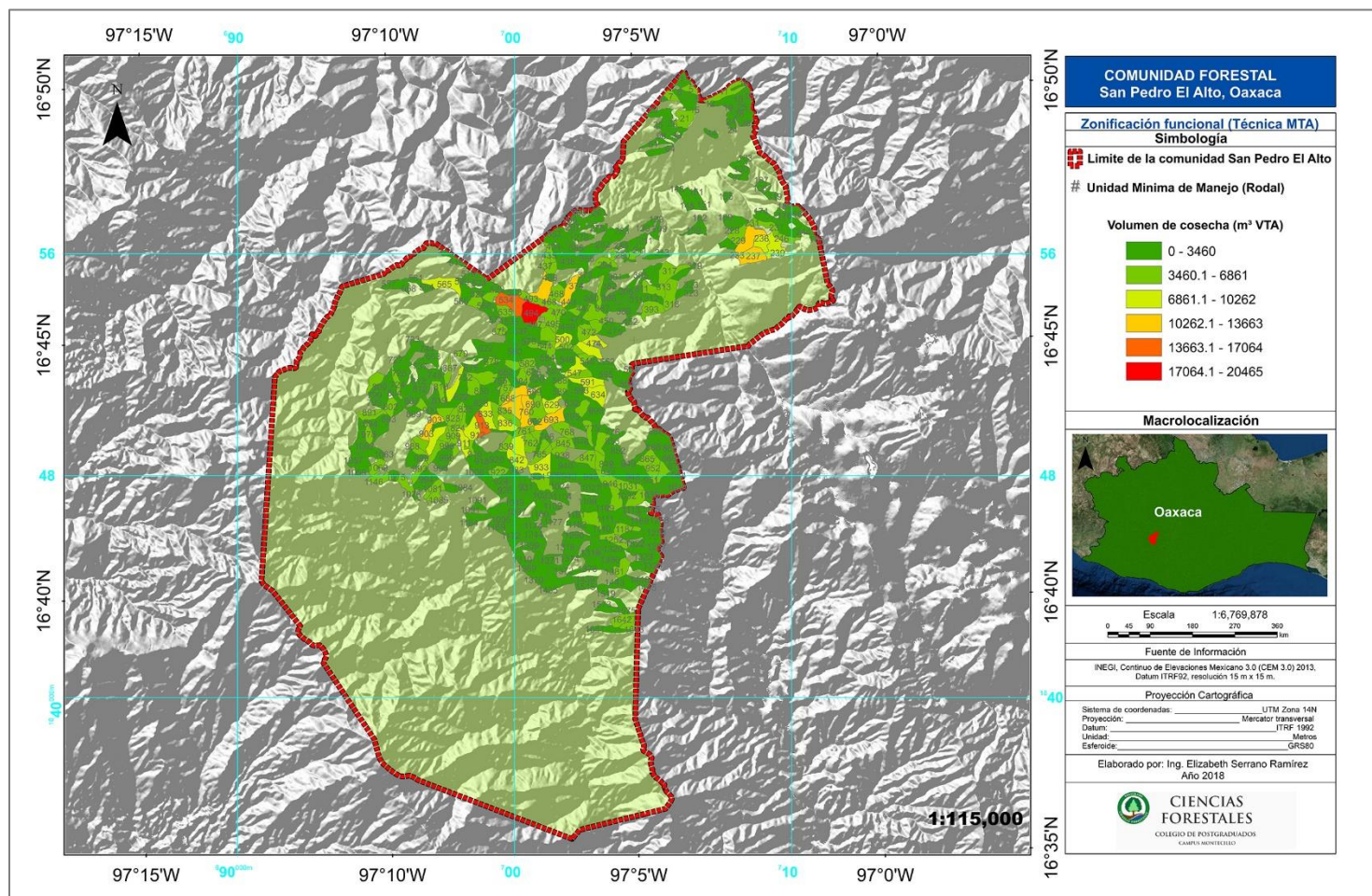
Anexo 10. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica BLS.



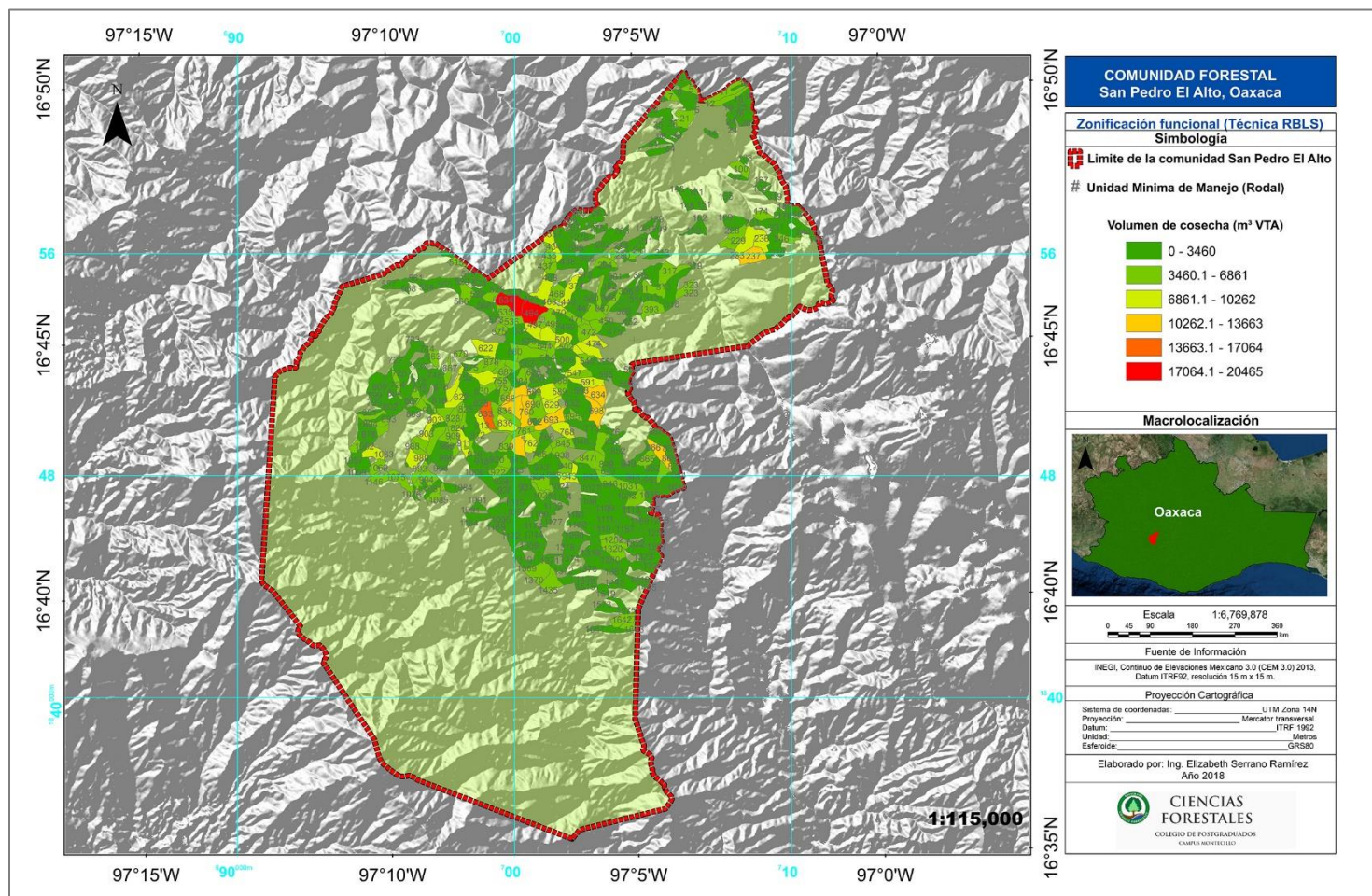
Anexo 11. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica BLM.



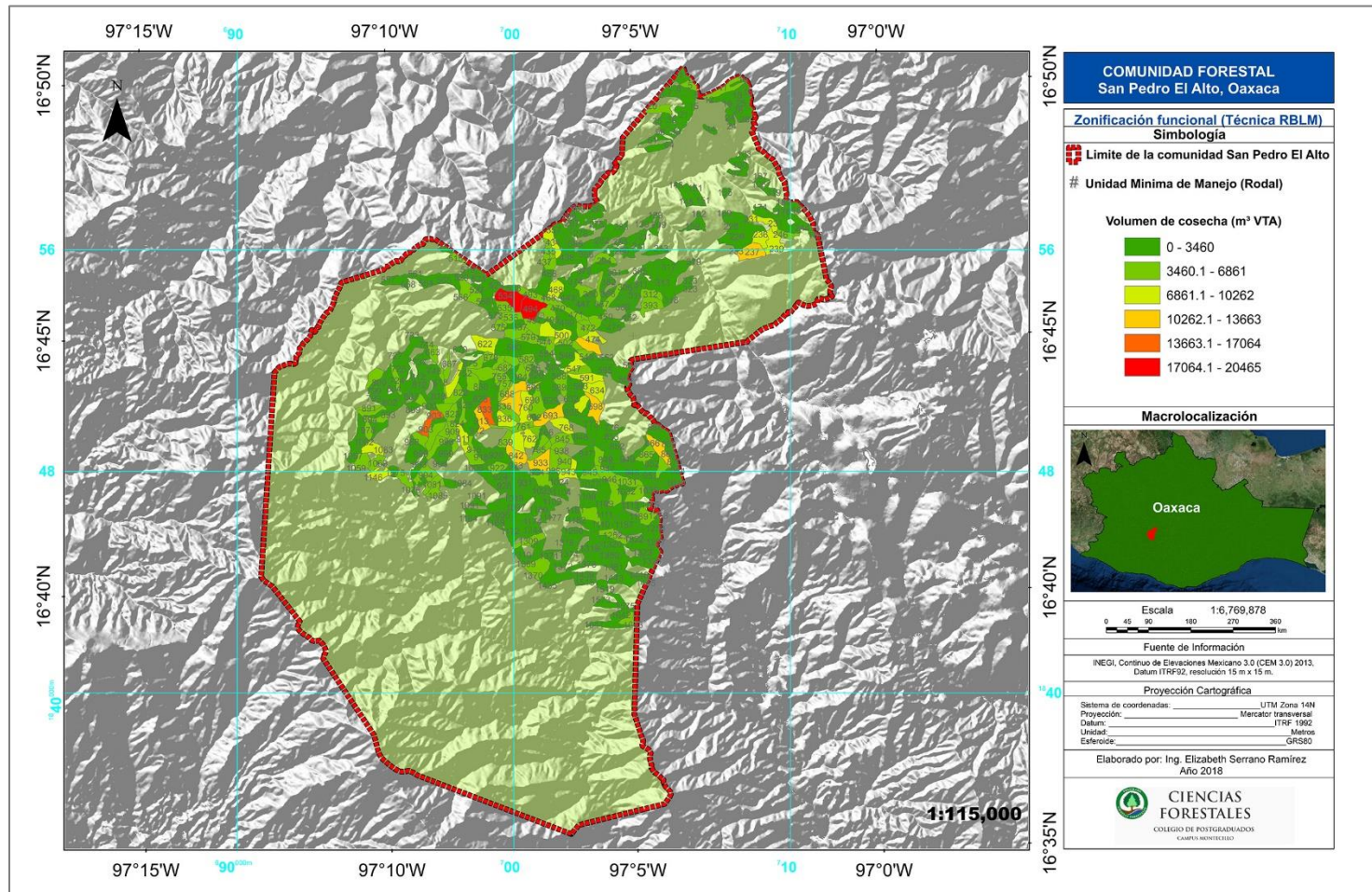
Anexo 12. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica MTA.



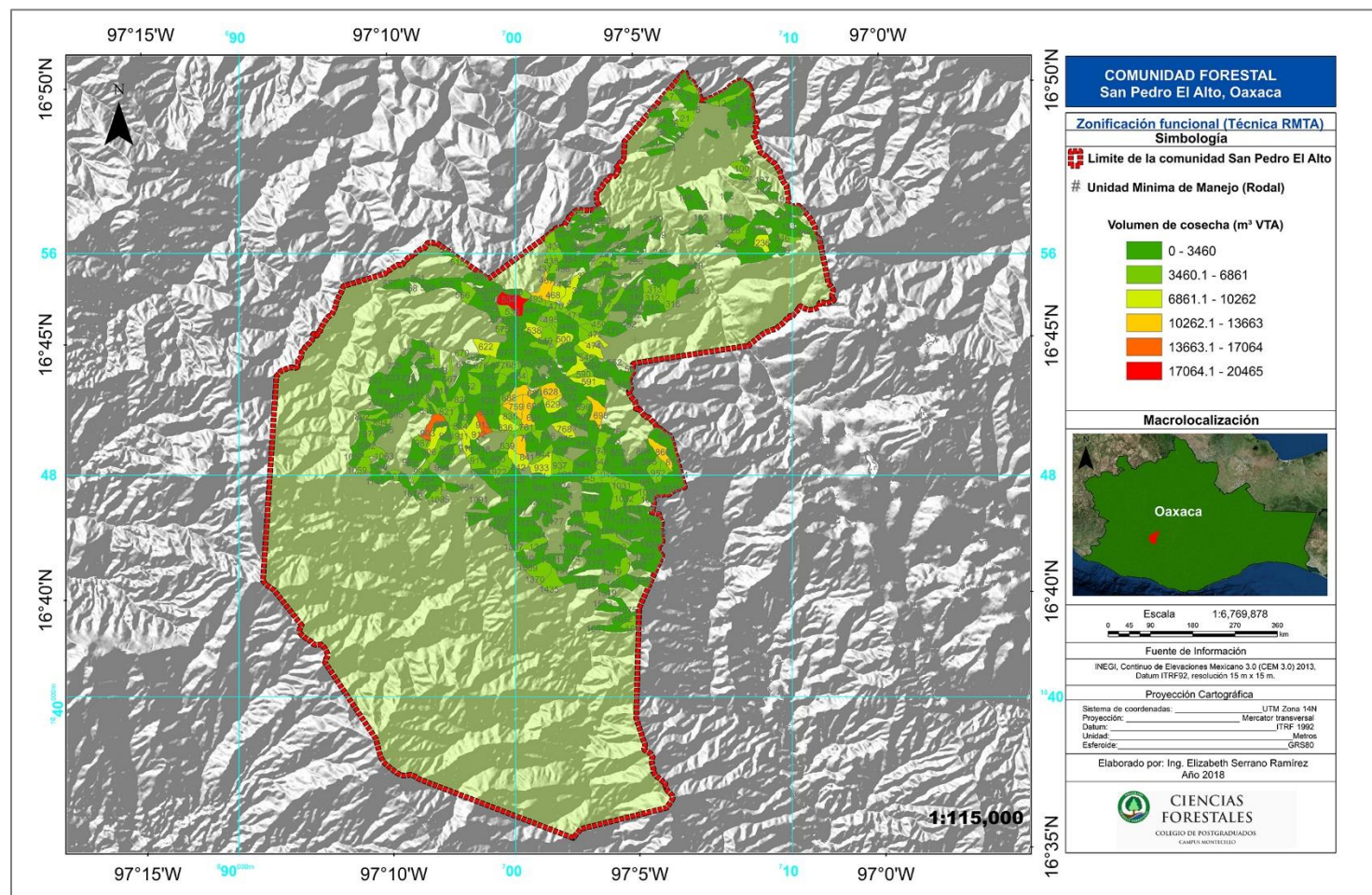
Anexo 13. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica RBLs.



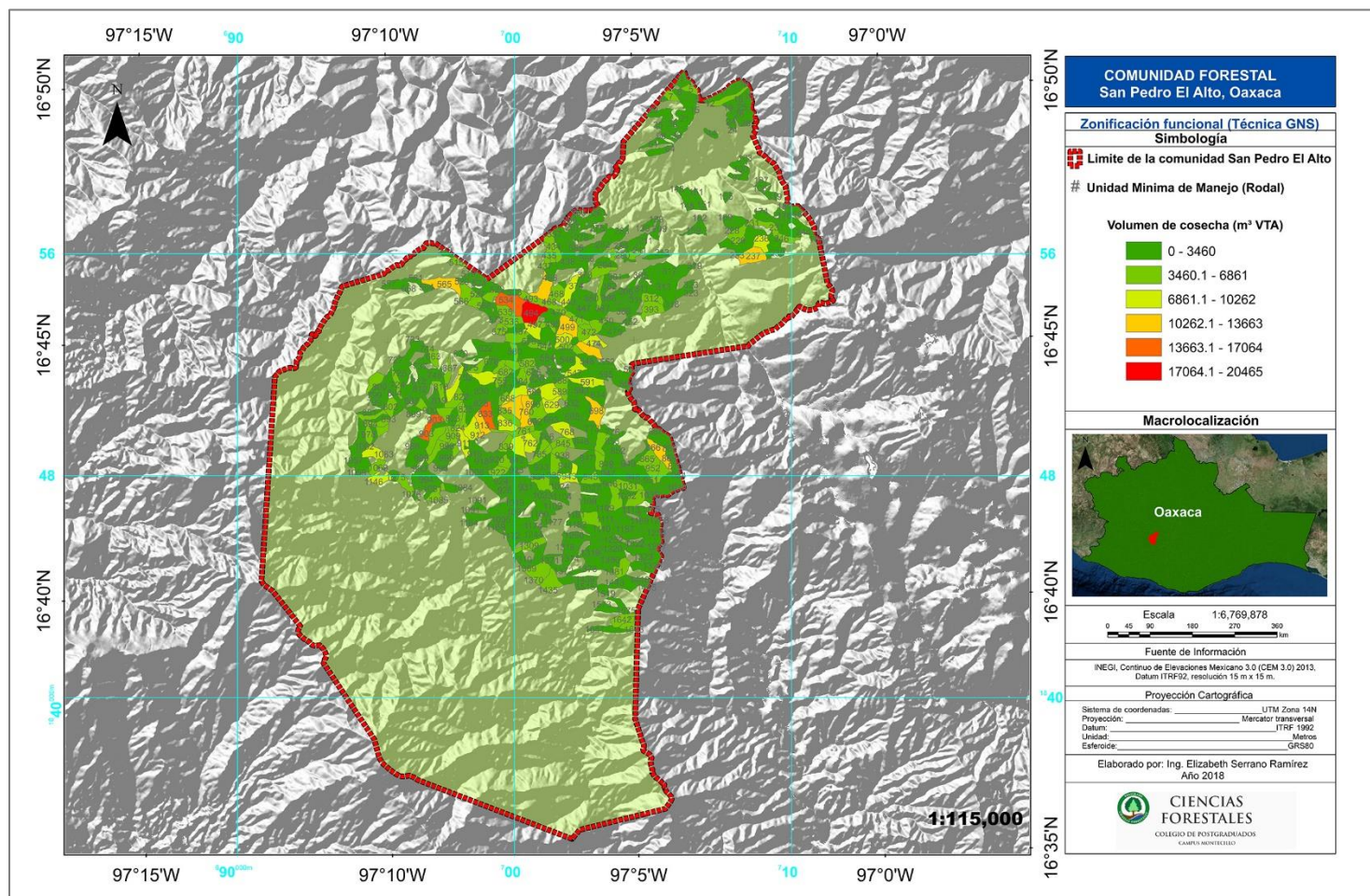
Anexo 14. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica RBLM.



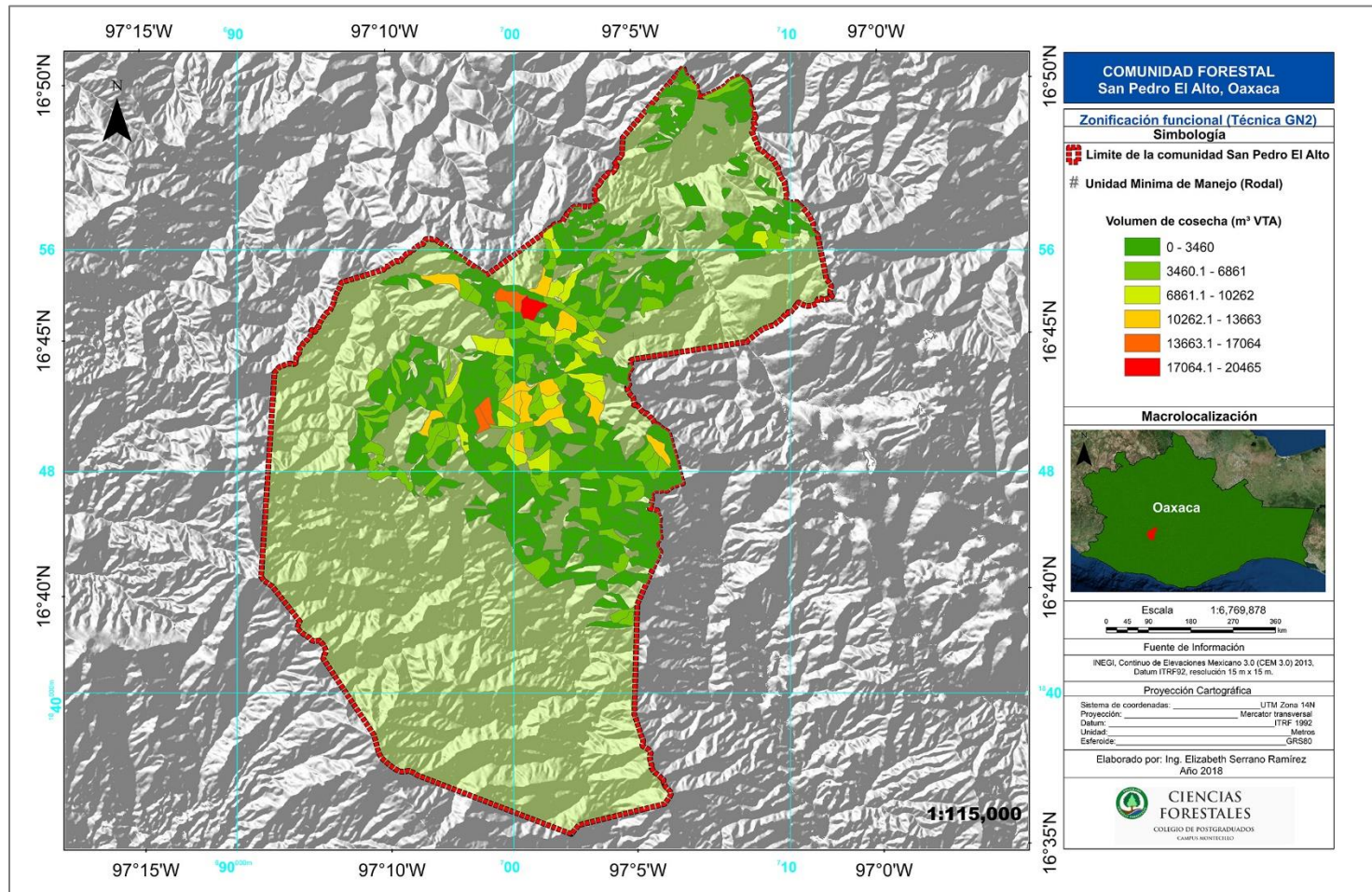
Anexo 15. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica RMTA.



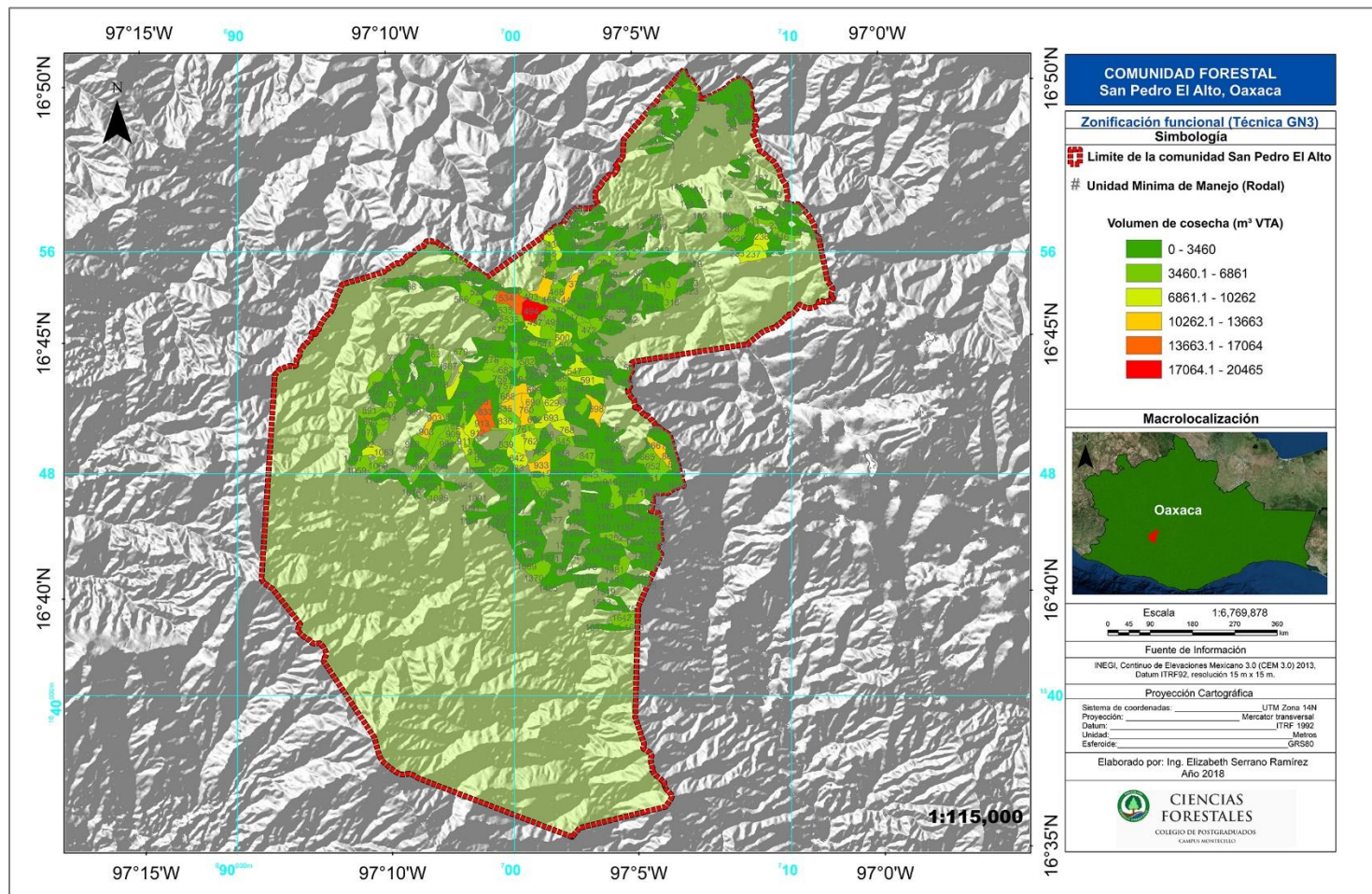
Anexo 16. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica GNS.



Anexo 17. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica GN2.

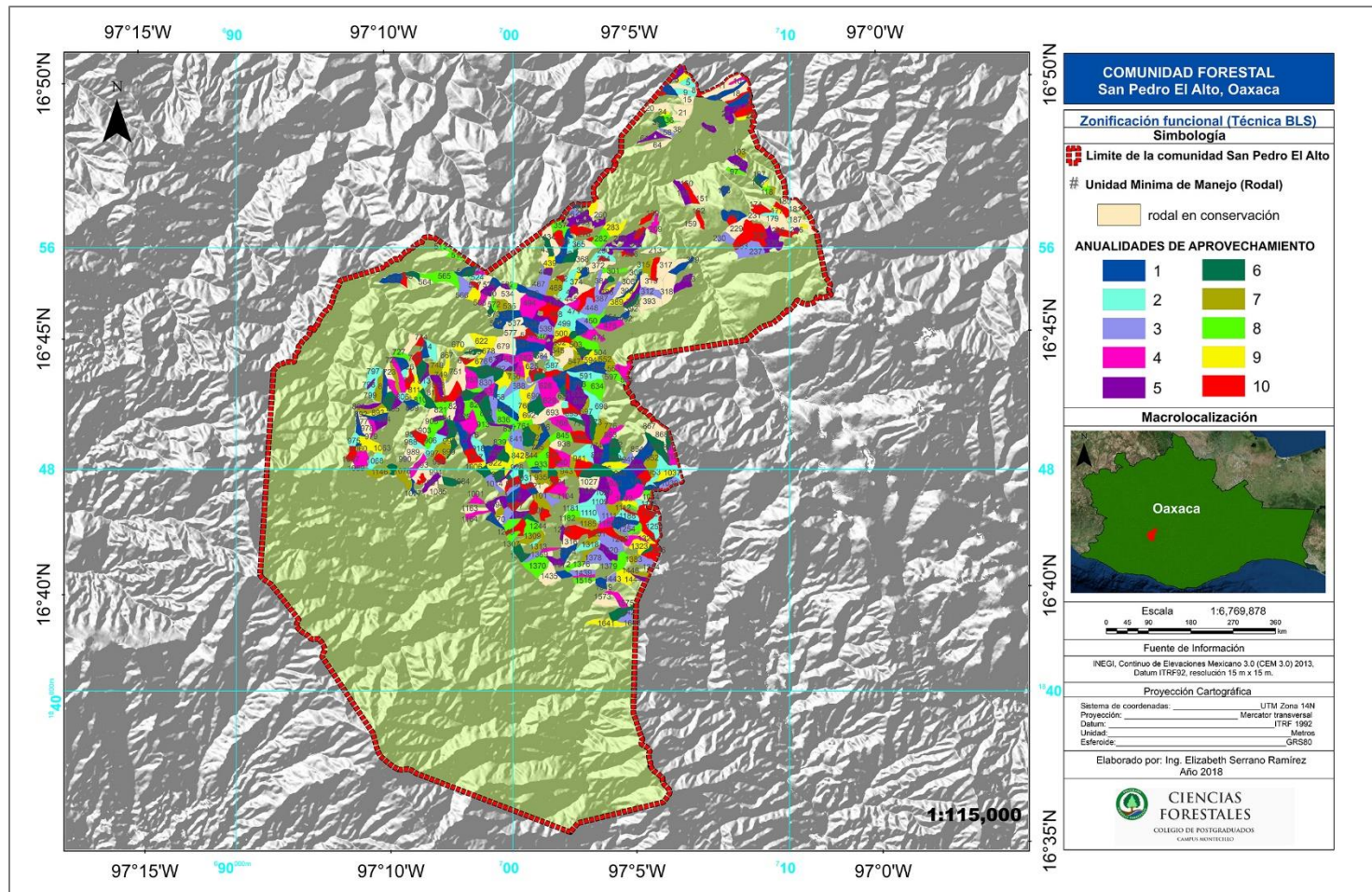


Anexo 18. Volumen de cosecha en cada rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica GN3.

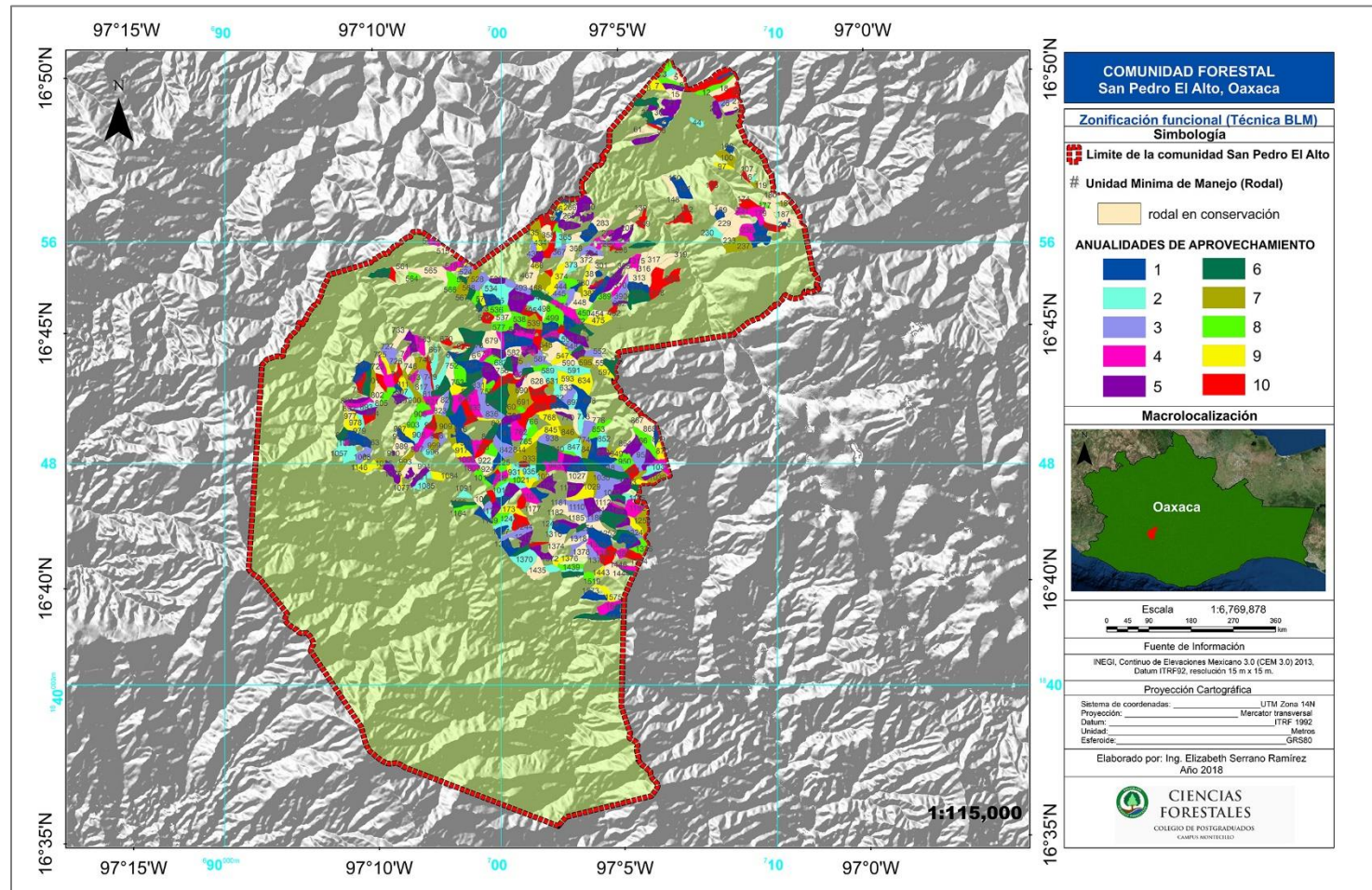


Periodos de cosecha por rodal

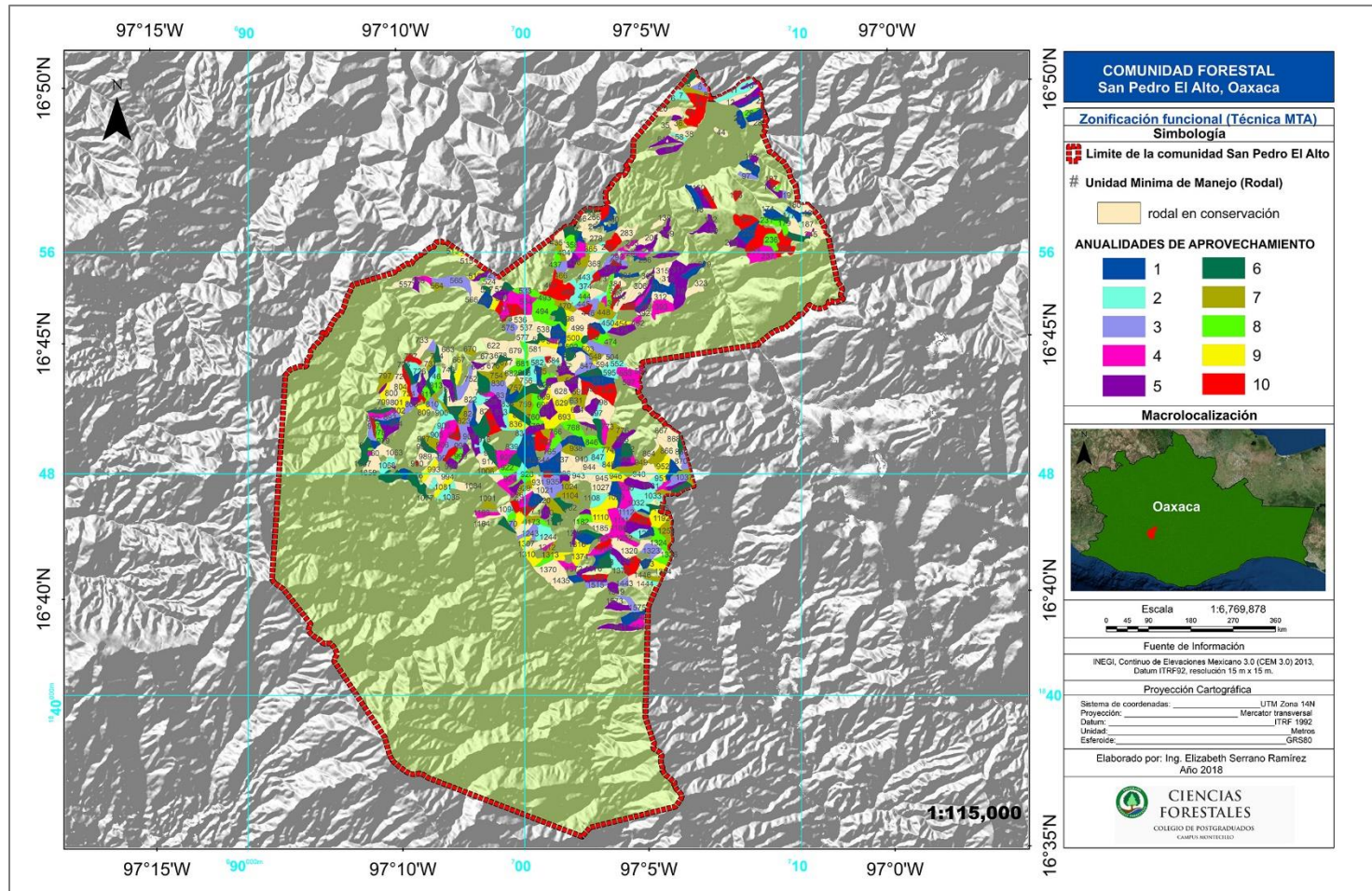
Anexo 19. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica BLS.



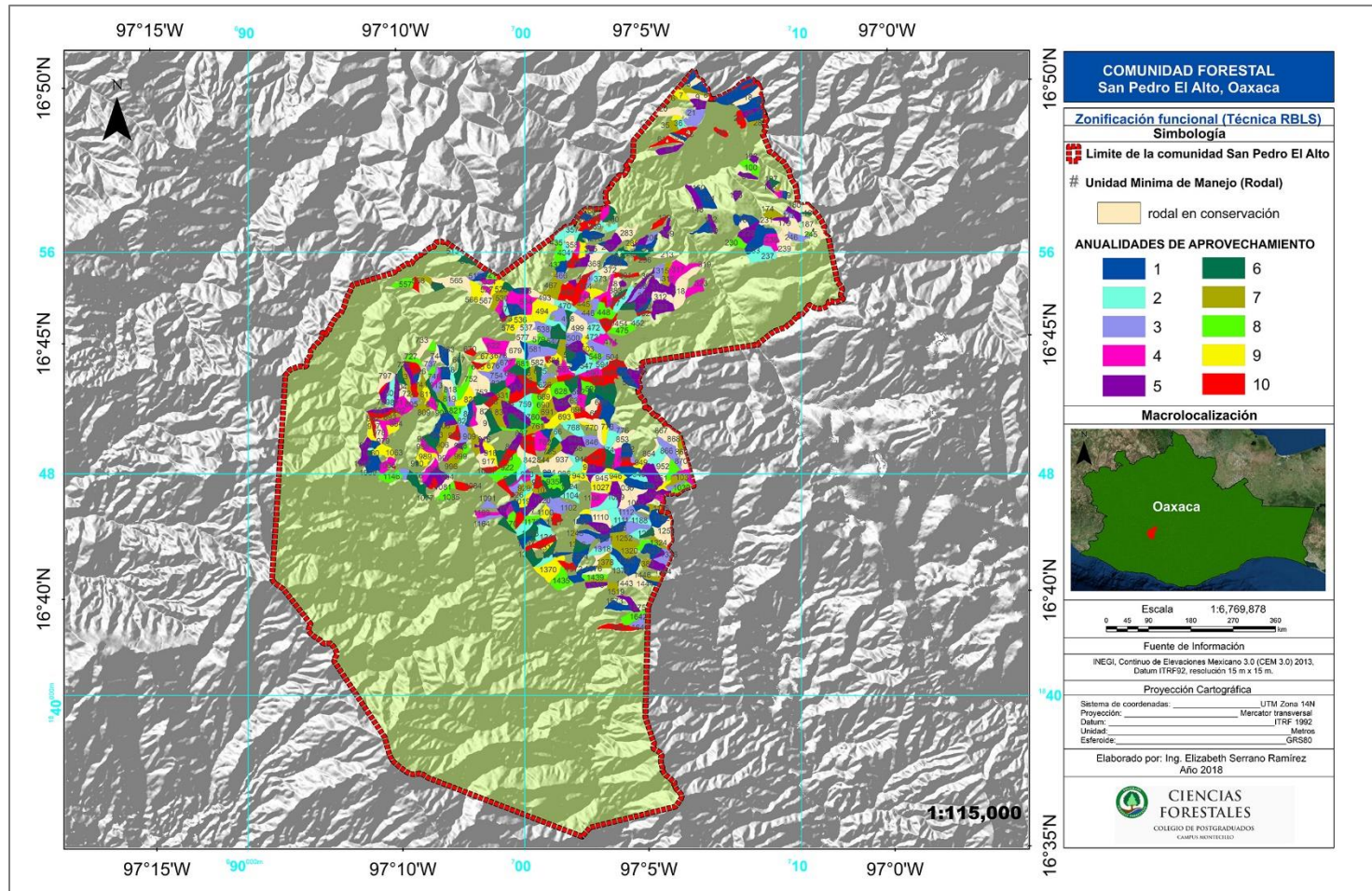
Anexo 20. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica BLM.



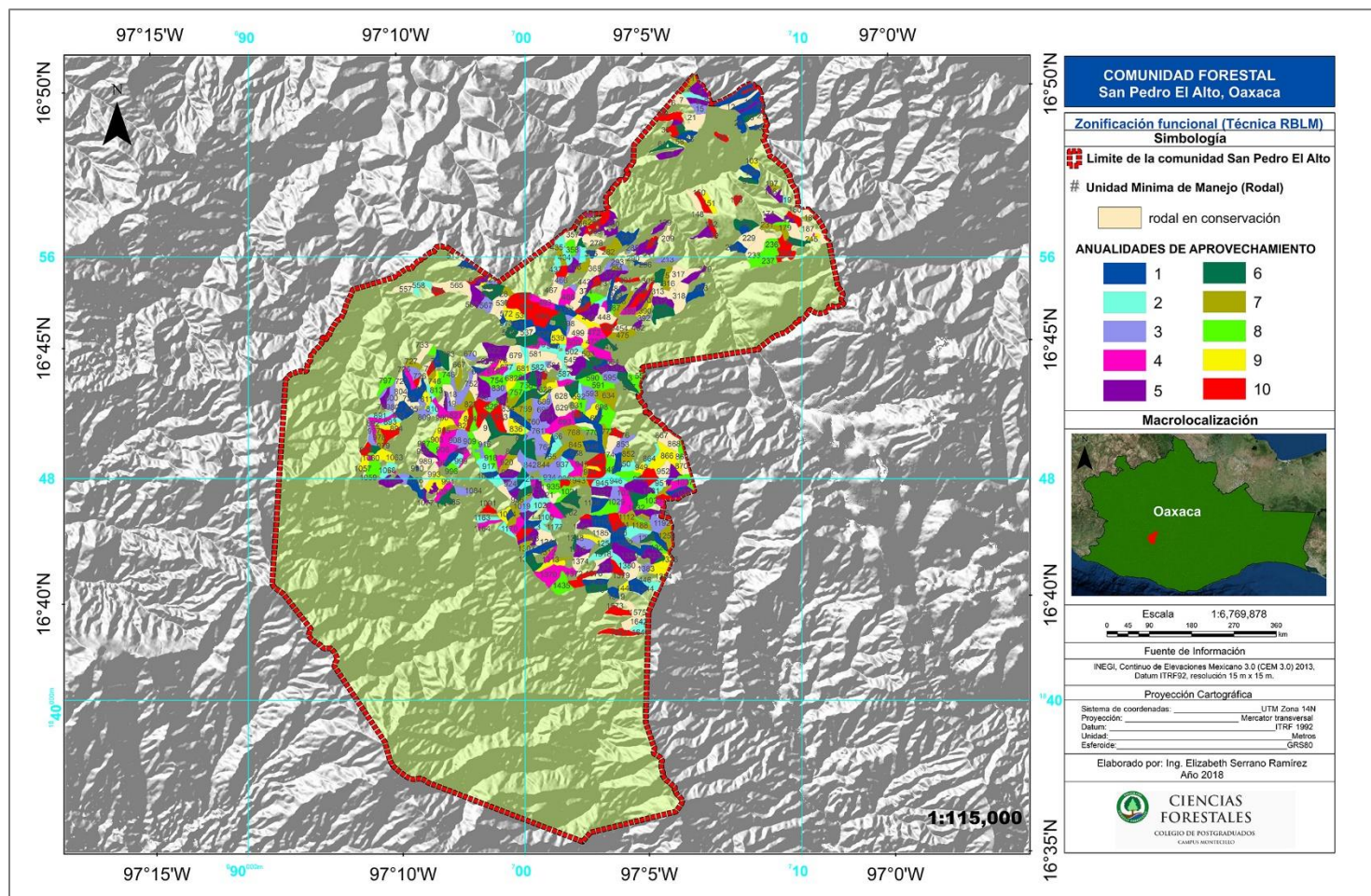
Anexo 21. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica MTA.



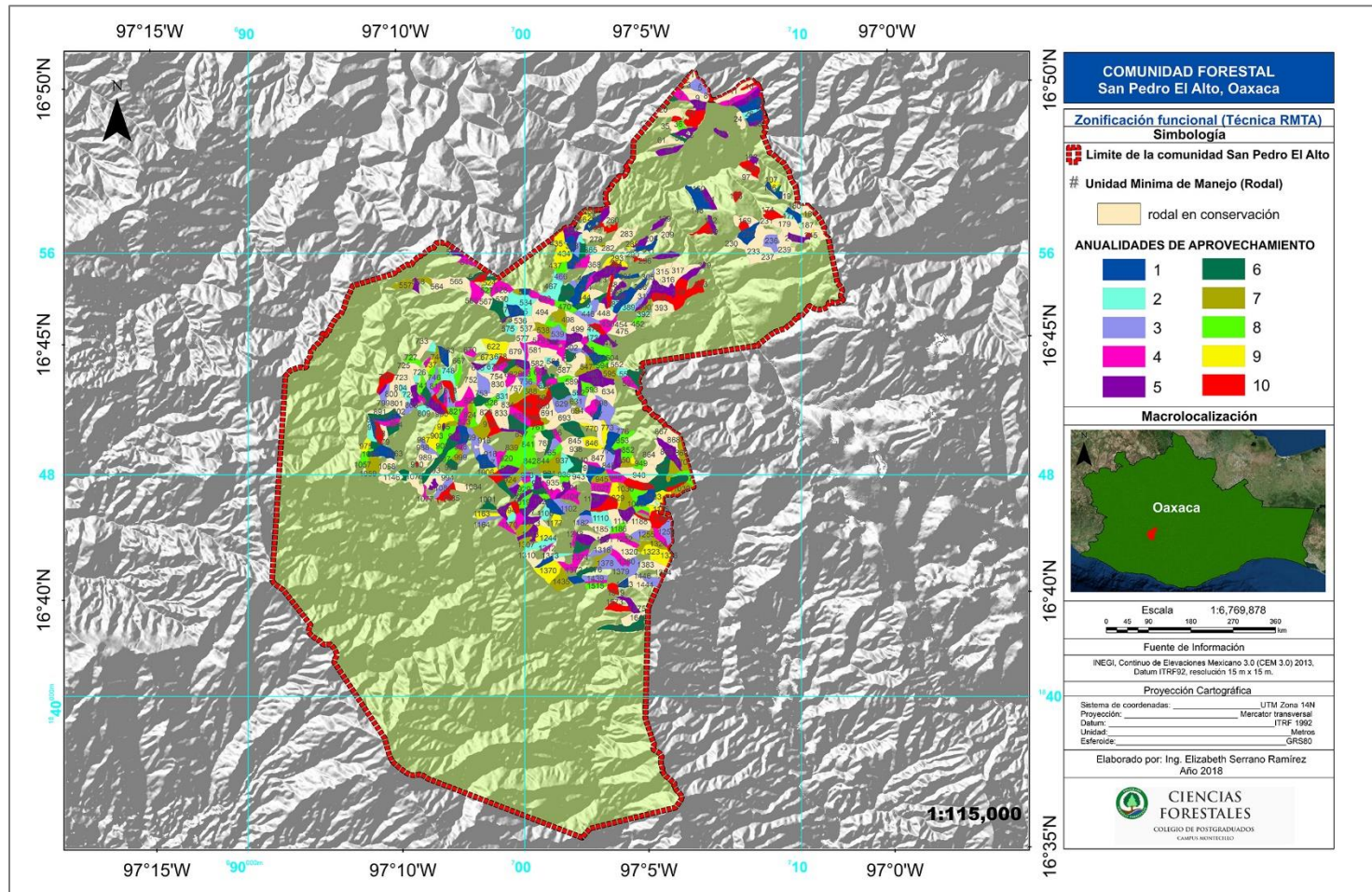
Anexo 22. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica RBLs.



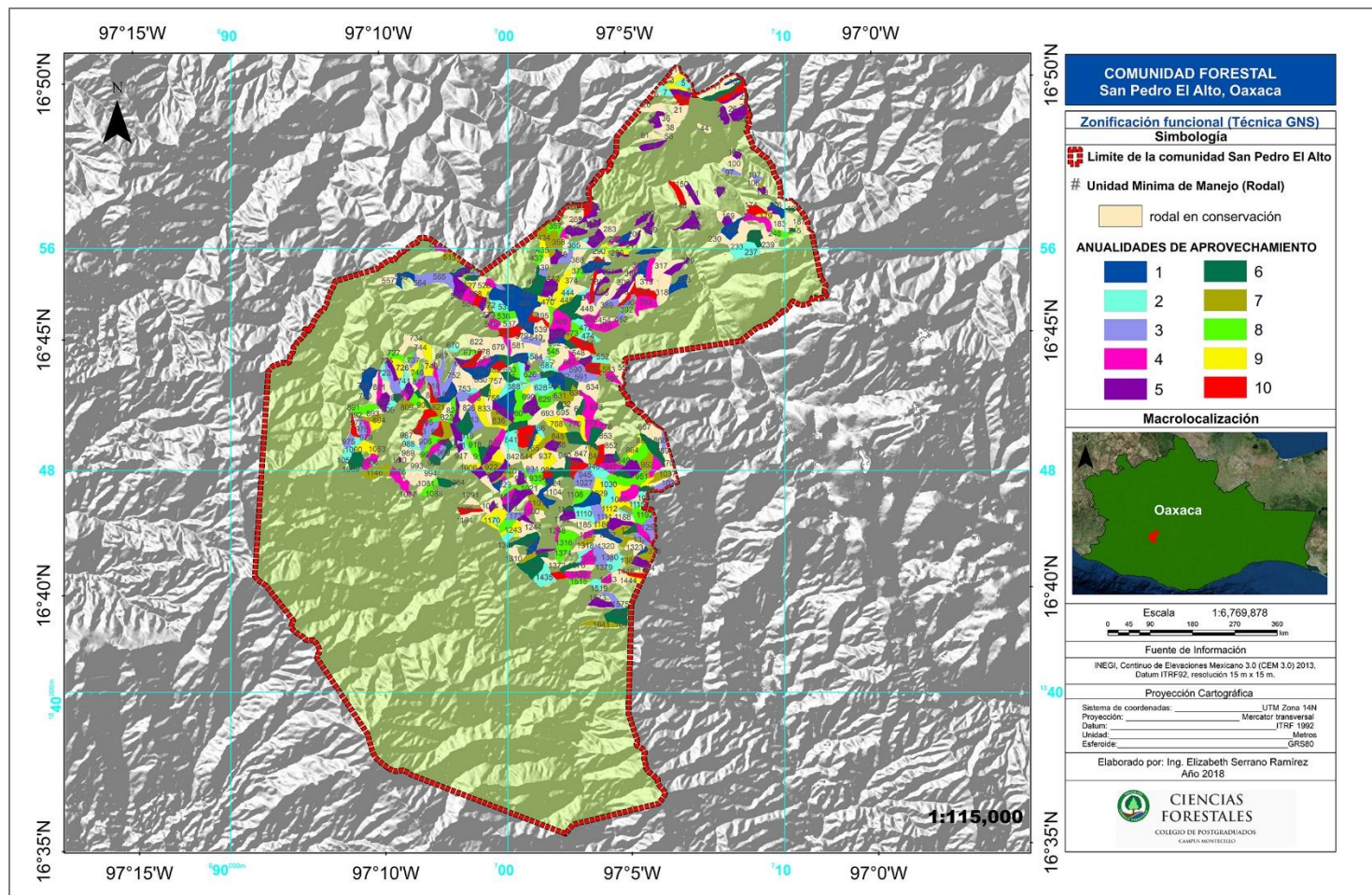
Anexo 23. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica RBLM.



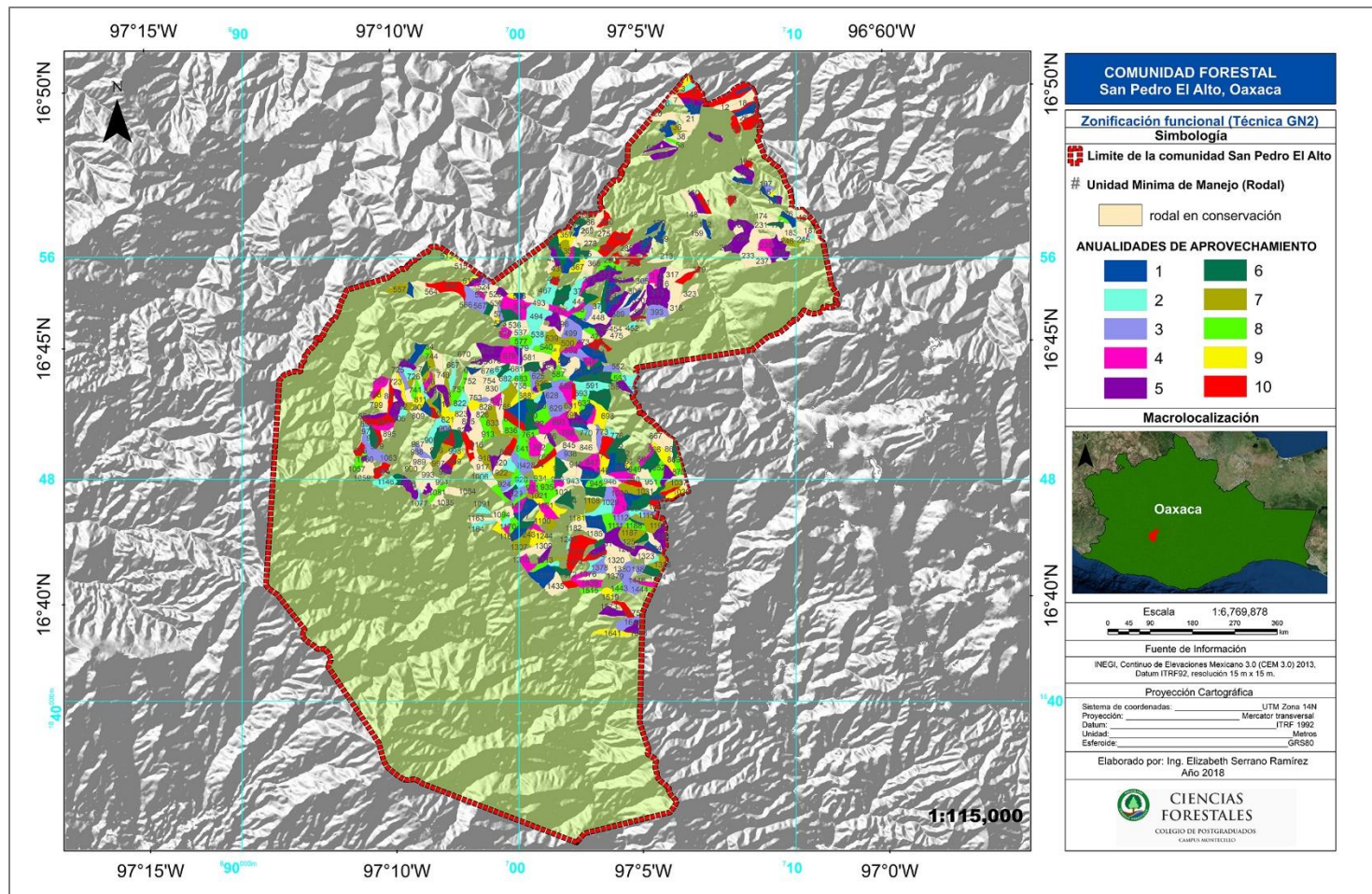
Anexo 24. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica RMTA.



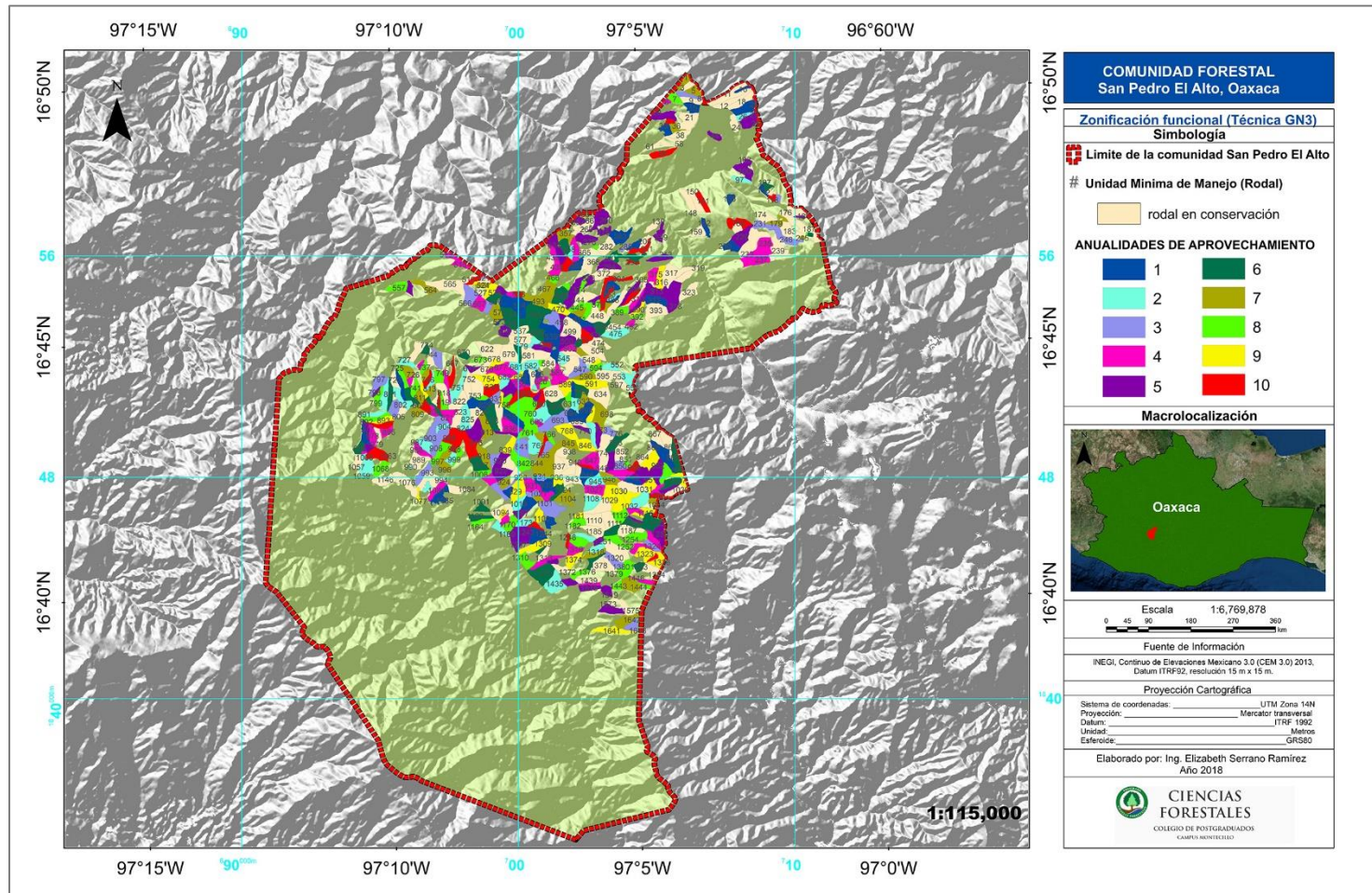
Anexo 25. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica GNS.



Anexo 26. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica GN2.

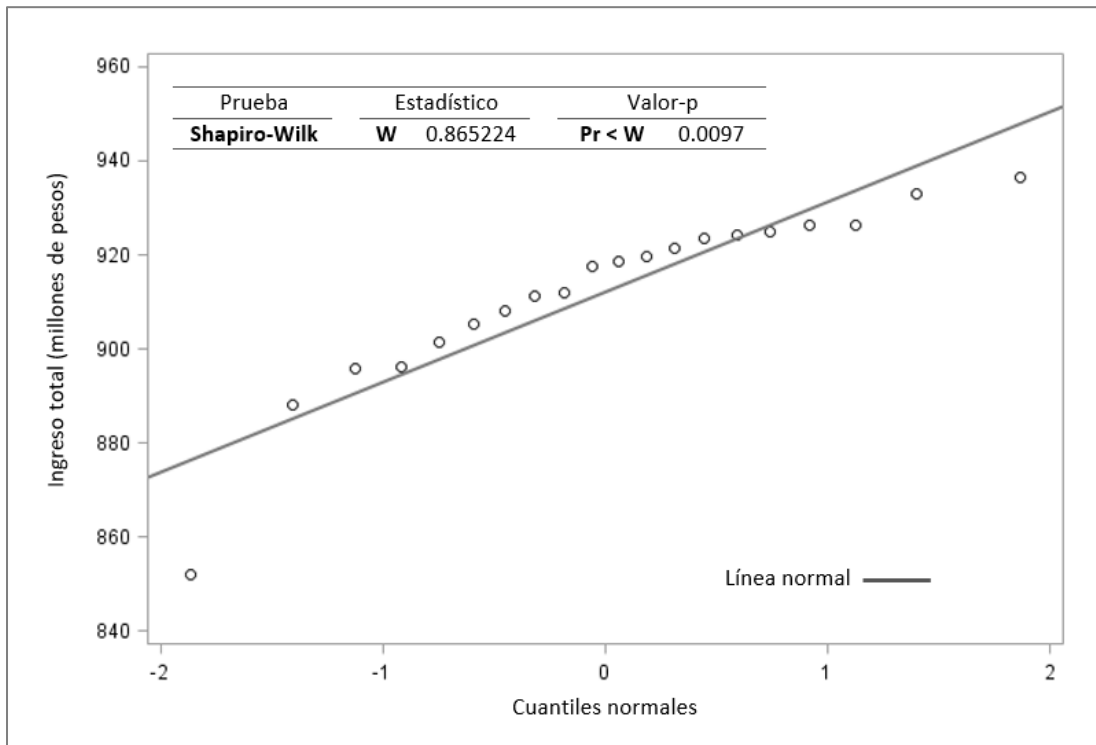


Anexo 27. Año de intervención por rodal, especificado por la mejor solución encontrada de la técnica GN3.

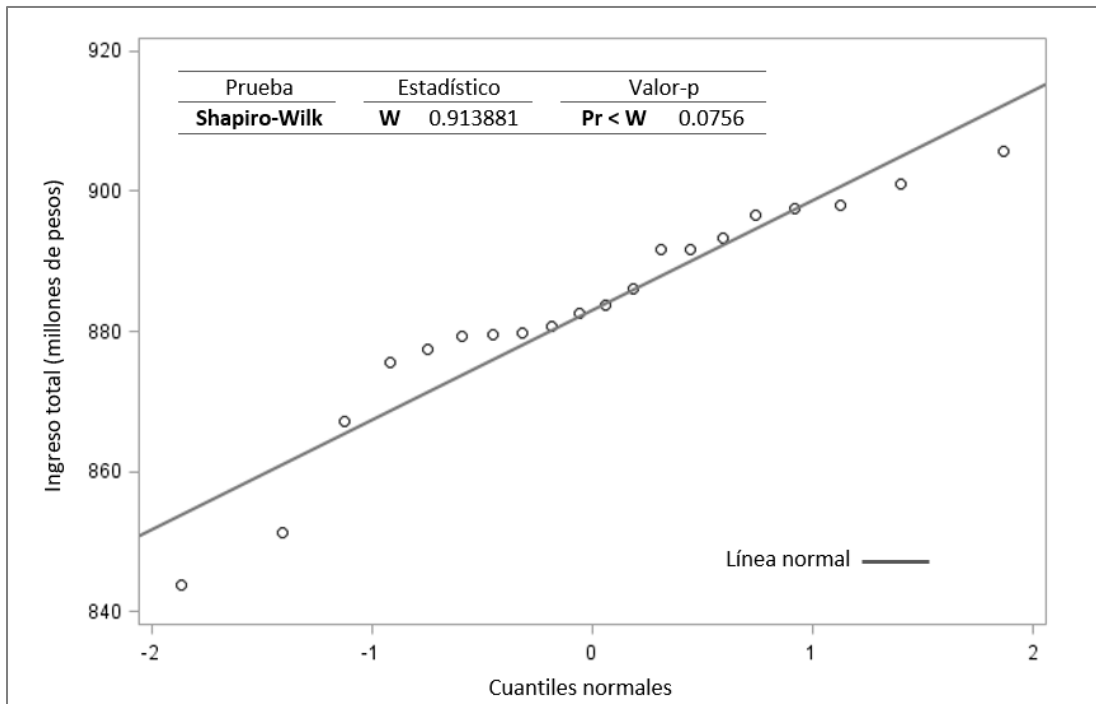


Pruebas de normalidad por técnica heurística

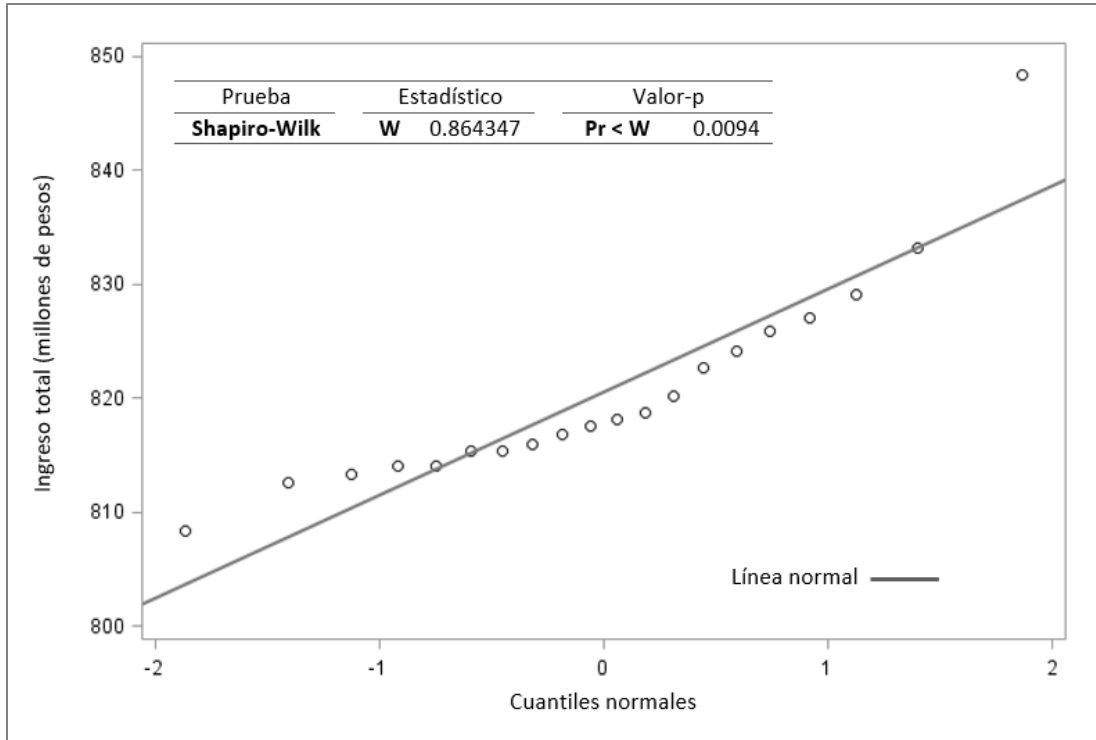
Anexo 28. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica BLS.



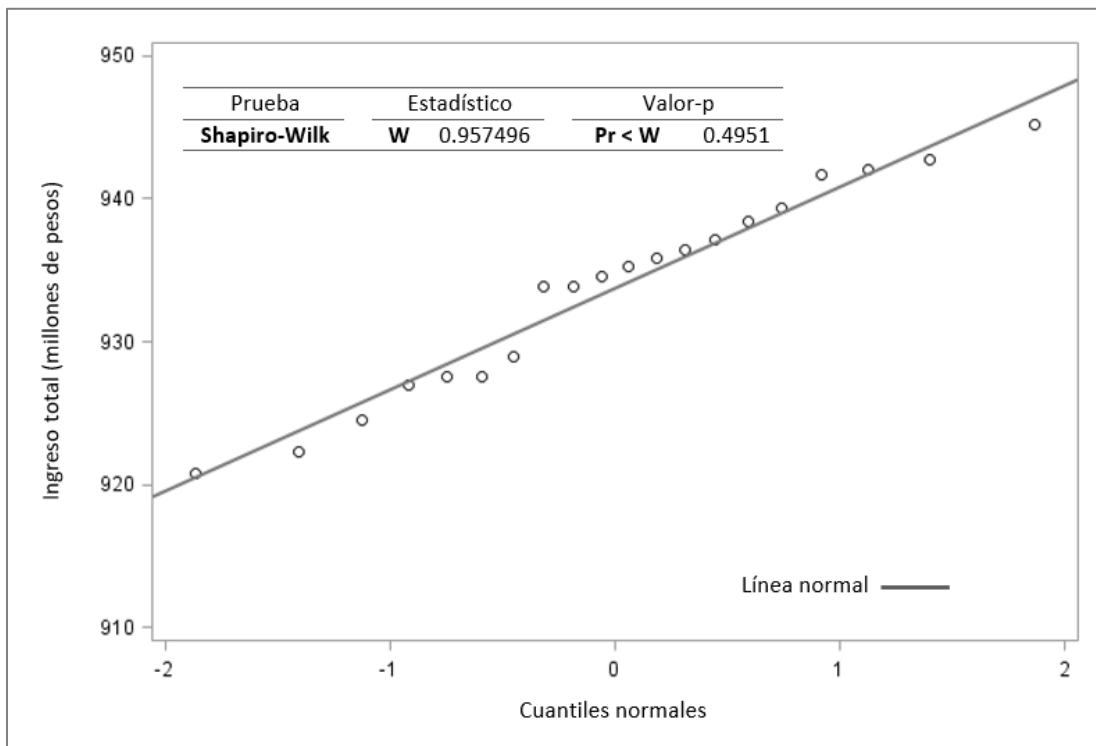
Anexo 29. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica BLM.



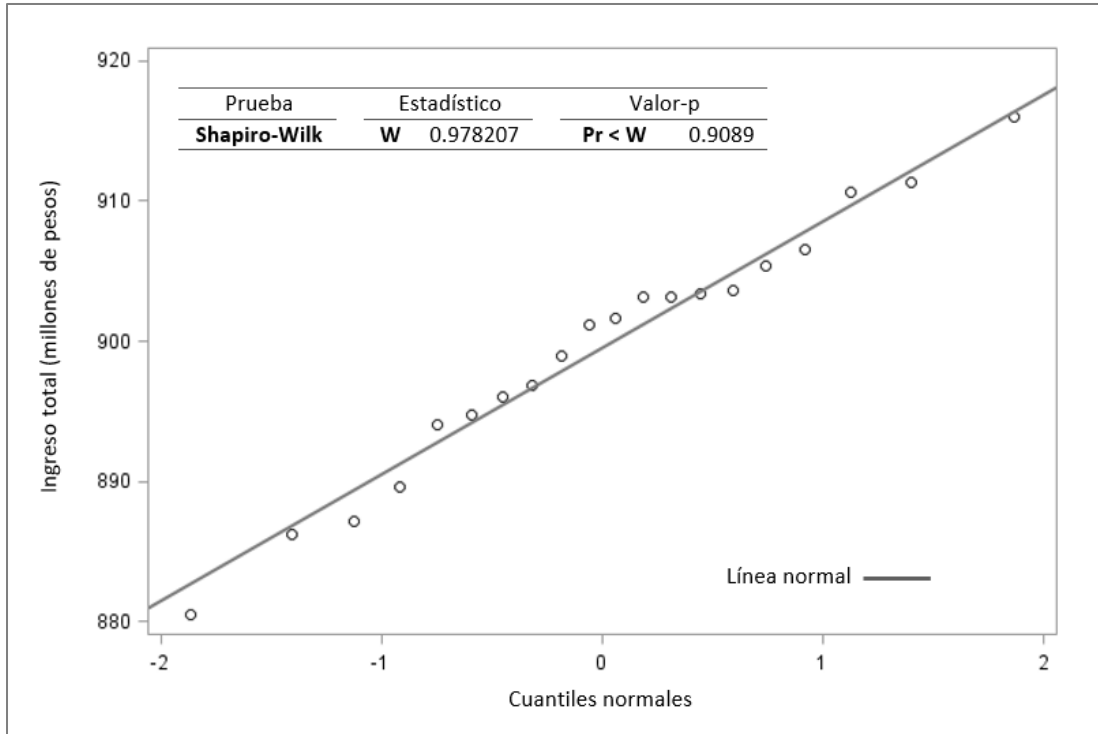
Anexo 30. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica MTA.



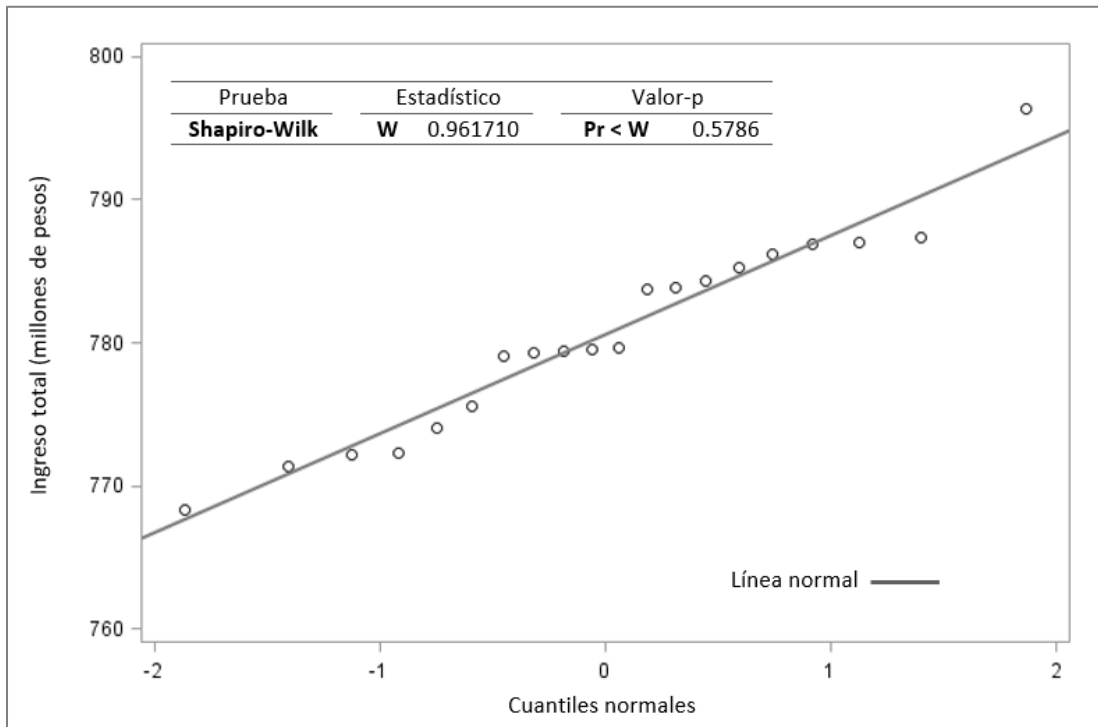
Anexo 31. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica RBLs.



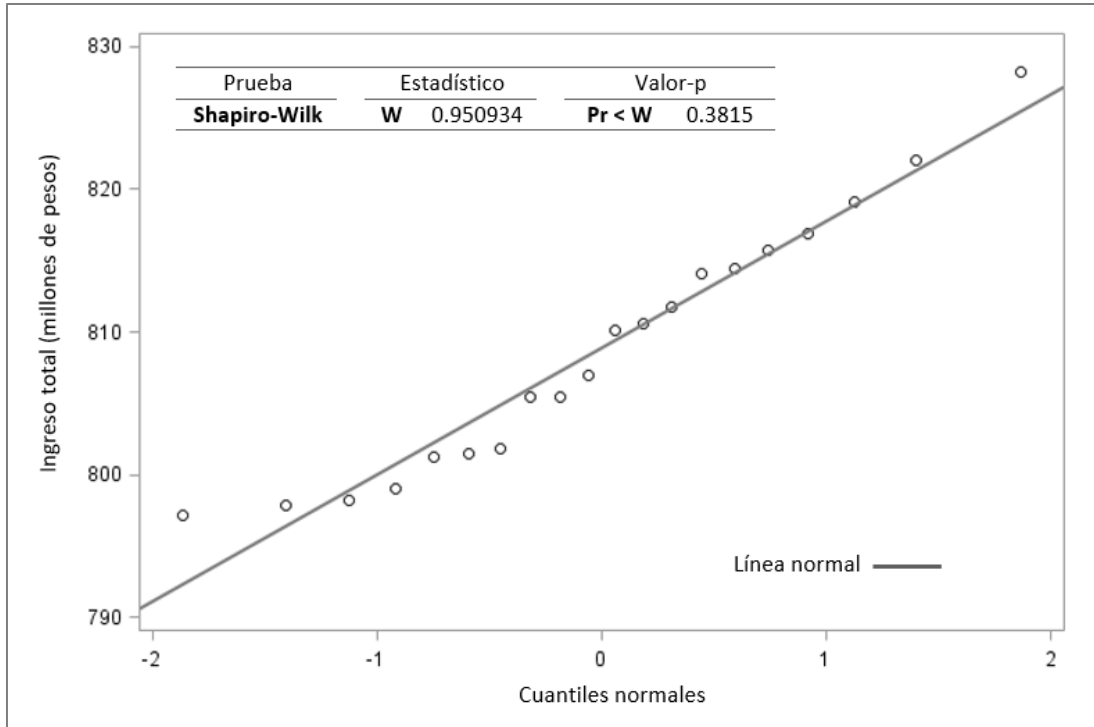
Anexo 32. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica RBLM.



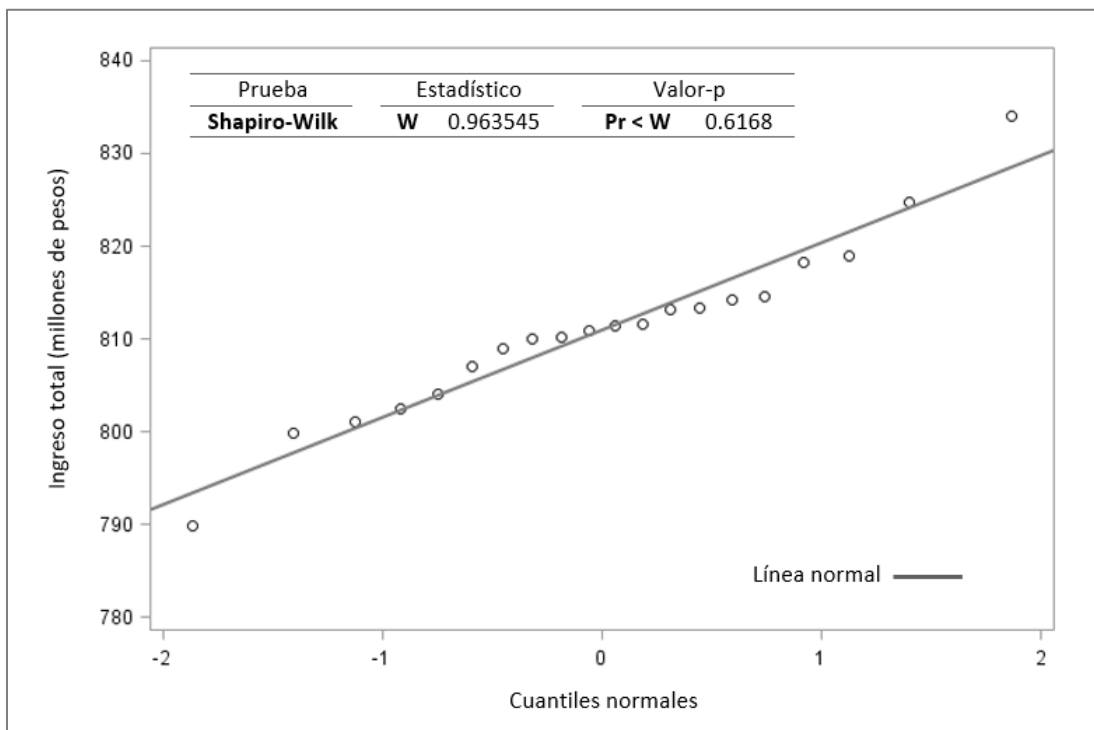
Anexo 33. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica RMTA.



Anexo 34. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica GNS.



Anexo 35. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica GN2.



Anexo 36. Gráfico Cuantil-Cuantil de los resultados obtenidos por la técnica GN3.

