



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

**Identificación espacial de áreas prioritarias para el pago por
servicios ambientales (PSA) hidrológicos y derivados de la
conservación de la biodiversidad en la Sierra Madre Oriental,
San Luis Potosí, México**

Por

Bertha Yazmín González Avilés

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

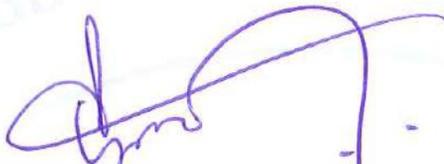
Magister Scientiae en Manejo y Conservación de Bosques
Tropicales y Biodiversidad

Turrialba, Costa Rica, 2011

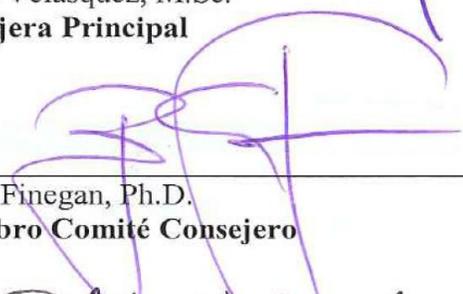
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y CONSERVACIÓN DE
BOSQUES TROPICALES Y BIODIVERSIDAD**

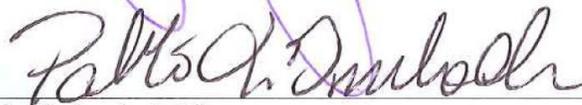
FIRMANTES:



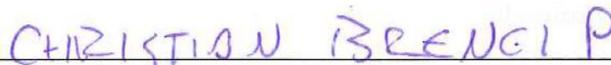
Sergio Velásquez, M.Sc.
Consejera Principal



Bryan Finegan, Ph.D.
Miembro Comité Consejero

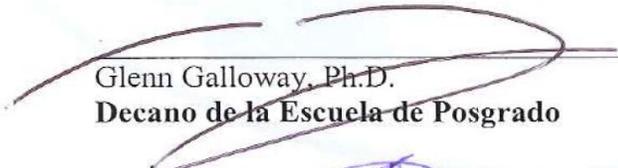


Pablo Imbach, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

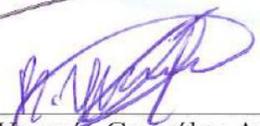


Cristian Brenes, M.Sc.
Miembro Comité Consejero

Humberto Reyes, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Bertha Yazmín González Avilés
Candidata

DEDICATORIA

A mis padres y a mí hermano, por estar siempre conmigo y brindarme en todo momento su apoyo y amor incondicional.....

A mis amigos, por apoyarme en las buenas y en las malas, por los momentos que hemos pasado juntos y a quienes siempre llevare en mi corazón donde quiera que estén.....

A mis profesores por darme las armas del conocimiento para lograr hacer de este mundo un mejor lugar para vivir.....

A mi tierra querida, por la conservación y preservación de sus recursos naturales.....

AGRADECIMIENTOS

A todos mis asesores de tesis por su valioso apoyo en la elaboración de este proyecto.

A los investigadores y funcionarios de las diversas instancias académicas, gubernamentales y ONG's del estado de San Luis Potosí, por la información proporcionada y por la aportación de su valioso conocimiento en el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Humberto Reyes Hernández por todo el apoyo brindado desde el principio de esta investigación y al proyecto FOSEC: SEMARNAT-CONACYT 2006-CO1-12754 por la información proporcionada, ya que sin su ayuda no hubiese sido posible la elaboración de este documento de tesis.

BIOGRAFÍA

El autor nació en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P, México, el 11 de Diciembre de 1982. Vivió los primeros 18 años de su vida muy ligada al ámbito rural y natural de su estado natal, en especial de la Huasteca Potosina, donde nació su amor por la conservación de los recursos naturales. Se graduó en el 2008 como Licenciada en Biología en el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) de la Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. Durante su carrera trabajo como aprendiz en una consultoría ambiental, especializándose en el área de las ciencias ambientales, con enfoque en manejo de cuencas hidrográficas y ordenamiento ecológico territorial. Una vez concluidos sus estudios de licenciatura, estuvo laborando como asistente de investigación en el Departamento de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica en el estado de San Luis Potosí, dentro del proyecto “Manejo del agua en ambientes urbanos, suburbanos y agrícolas del Valle de San Luis Potosí”. Su afición por la restauración, conservación y el uso sostenible de los recursos naturales, la llevo a estudiar la maestría en Manejo y conservación de bosques y biodiversidad en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), en Turrialba, Costa Rica. Durante sus estudios de posgrado aprendió todo acerca de la restauración, manejo y conservación de bosques y espera poder aplicar esta rama del conocimiento en pro del buen manejo de los ecosistemas naturales de su país.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
BIOGRAFÍA.....	V
CONTENIDO	VI
RESUMEN	IX
SUMMARY	X
ÍNDICE DE CUADROS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	XVI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática e importancia del estudio	1
<i>1.1.1 Justificación del estudio.....</i>	2
1.2 Objetivos del estudio.....	4
<i>Objetivo general.....</i>	4
<i>Objetivos específicos.....</i>	4
2 MARCO CONCEPTUAL	5
2.1 Los servicios de los ecosistemas y la valoración del ambiente	5
2.2 El Pago por Servicios Ambientales (PSA).....	7
2.3 El Pago por Servicios Ambientales en México.....	8
2.3.1 <i>El esquema de PSA en México.....</i>	8
2.3.2 <i>Debilidades del esquema de PSA en México</i>	11
2.4 Biodiversidad	12
2.4.1 <i>Conservación de la Biodiversidad a nivel de paisaje.....</i>	13
2.4.2 <i>Priorización de áreas para la conservación de la biodiversidad.....</i>	14
2.4.3 <i>La función de los Sistemas Agroforestales en la conservación de la Biodiversidad</i>	16
2.5 Servicios Hidrológicos.....	18
2.5.1 <i>Relación entre la cobertura forestal y la calidad-cantidad de agua.....</i>	18

2.5.2	<i>Usos del agua</i>	20
2.5.3	<i>Cantidad y calidad del agua en México</i>	21
2.6	Riesgo y amenazas de perder los SE.....	22
2.6.1	<i>Deforestación</i>	23
2.6.2	<i>Contaminación</i>	24
2.7	Los Sistemas de Información Geográfica en las Ciencias Ambientales.....	25
2.8	Análisis de Decisión Multicriterio.....	26
2.8.1	<i>Construcción del Análisis de Decisión Multicriterio Espacial</i>	27
2.8.2	<i>Pasos para el Análisis de Decisión Multicriterio espacial</i>	28
2.9	Zona de estudio	30
2.9.1	<i>La Sierra Madre Oriental</i>	30
2.9.2	<i>Generalidades de la Sierra Madre Oriental en San Luis Potosí</i>	31
2.9.3	<i>Problemática ambiental de la Sierra Madre Oriental en San Luis Potosí</i>	34
2.9.4	<i>El PSA en la zona de estudio</i>	35
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
3.1	Enfoque general	36
3.2	Asignación de valores y pesos a criterios e indicadores	39
3.3	Priorización de áreas por la provisión de SE derivados de la conservación de la Biodiversidad	41
3.3.1	<i>Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por conservación de la biodiversidad</i>	43
3.3.2	<i>Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por la implementación de SAF</i>	54
3.4	Priorización de áreas por la provisión de SE hidrológicos	60
3.4.1	<i>Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por la oferta de calidad y cantidad de agua</i>	61
3.4.2	<i>Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por la demanda de agua</i>	66
3.5	Priorización de áreas por el riesgo o amenaza de perder los SE.....	72
3.6	Análisis de correlación y sensibilidad.....	78
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	80

4.1 Resultados: Identificación espacial de áreas prioritarias para la conservación y el PSA en la SMO	80
4.1.1 Identificación espacial de la oferta relativa de servicios ambientales derivados de la conservación de la biodiversidad	82
4.1.2 Identificación espacial de Áreas prioritarias para implementar SAF	84
4.1.3 Identificación espacial de la oferta relativa de servicios ambientales hidrológicos.....	86
4.1.4 Identificación espacial de la demanda relativa de servicios ambientales hidrológicos	88
4.1.5 Identificación espacial del riesgo y la amenaza relativa para los SE.....	90
4.1.6 Áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la Biodiversidad	92
4.1.7 Áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos.....	94
4.1.8 Áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE.....	96
4.2 Resultados: Análisis de correlación y sensibilidad.....	99
4.2.1 Correlación espacial entre indicadores.....	99
4.2.2 Correlación espacial entre criterios.....	101
4.2.3 Correlación espacial entre “outputs”	103
4.2.4 Análisis de sensibilidad.....	105
4.3 Discusión de los resultados.....	108
4.3.1 Áreas priorizadas para el PSA en la SMO	108
4.3.2 Correlación espacial entre indicadores y entre criterios.....	109
4.3.3 Correlación espacial entre “outputs”	110
4.3.4 Análisis de sensibilidad.....	111
4.3.5 Medición de los criterios utilizados en la identificación espacial de áreas prioritarias para el PSA.....	111
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
6 BIBLIOGRAFÍA	116
ANEXOS	127

González-Avilés, B.Y. 2011. Identificación espacial de áreas prioritarias para el pago por servicios ambientales (PSA) hidrológicos y derivados de la conservación de la biodiversidad en la Sierra Madre Oriental, San Luis Potosí, México. Tesis, Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.165 p.

RESUMEN

Se diseñó un método para identificar espacialmente áreas prioritarias para el Pago por Servicios Ambientales (PSA) en la región fisiográfica de la Sierra Madre Oriental (SMO), en el estado de San Luis Potosí, México. La finalidad de este método, es identificar a una escala regional las áreas de mayor importancia por la oferta, la demanda y el riesgo de perder los servicios ecosistémicos (SE). El enfoque de esta metodología se basa en priorizar espacialmente áreas, por lo que se lleva a cabo, empleando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis de Decisión Multicriterio Espacial (MCDA), mediante los cuales se combinan una serie de indicadores y criterios en forma de mapas. El estudio se basa en los usos del suelo y los servicios ambientales considerados dentro del esquema actual de PSA en México. Dichos usos del suelo son los sistemas agroforestales (SAF) y la conservación del bosque; los servicios ambientales considerados por dicho esquema, son los derivados de la conservación de la biodiversidad y los servicios hidrológicos. El riesgo de perder la provisión de SE es evaluado como el riesgo de deforestación. Los resultados indican que el 39.5% (304,770 ha) de superficie en la SMO son áreas de alta a muy alta prioridad por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad, mientras que el 18.5% (140,227 ha) son áreas de alta a muy alta prioridad por la oferta, demanda y riesgo de perder los SE hidrológicos. El método resultante puede ser adaptado para diferentes objetivos, ya que la oferta, demanda y riesgo de perder los SE pueden ser evaluados de forma separada y acorde a las preferencias de los diferentes tomadores de decisiones. También permite adaptarse a cambios en la evidencia científica, por lo tanto, los pesos asignados a cada variable pueden ser modificados. Se recomienda realizar estudios similares en otras regiones del país, con el fin de validar los pesos en la estandarización de los indicadores y criterios empleados en este método.

Palabras clave: Pago por Servicios Ambientales, biodiversidad, servicios hidrológicos, SIG, Análisis de Decisión Multicriterio Espacial

SUMMARY

A methodology was developed to identify priority areas to receive Payment for Environmental Services (PES) in the physiographic region Sierra Madre Oriental (SMO) of San Luis Potosí, Mexico. The methodology purpose is to locate on a regional scale the most important areas by the supply, demand and risk of losing environmental services (ES). This method focus on spatially prioritize areas, therefore Geographical Information Systems (GIS) and Multicriteria Decision Analysis (MCDA) are used. Through both elements are combined a range of criteria and indicators in the form of maps. The study is framed on the environmental services and land use activities selected under the actual Mexican PES scheme. Such eligible environmental services are biodiversity and hydrological. The eligible land use activities are forest conservation and agroforestry systems. The risk of losing the ES provision was evaluated as the risk of deforestation for forest covered. The results indicates that 39.5% of the SMO surface (304,770 ha) are high to very high priority areas by supply and risk of losing biodiversity services, while 18.5% of its surface (140,227 ha) are high to very high priority areas by supply, demand and risk of losing hydrological services. The resulting methodology can be adapted to different purposes, as the supply, demand and risk of losing the SE can be assessed separately and according to the preferences of different decision-makers. It also allows to adapt to changes in scientific evidence, therefore, the weights assigned to each variable can be modified. We recommend similar studies in other regions, in order to validate the weights standardization of indicators and criteria used in this method.

Key words: Payment for Environmental Services, Biodiversity, Hydrological, GIS, Multicriteria Decision Analysis

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Peso asignado a los ecosistemas por su riqueza y endemismo de especies.....	44
Cuadro 2. Peso asignado a los ecosistemas por su superficie perdida a nivel regional.....	45
Cuadro 3. Peso asignado a los ecosistemas por su superficie perdida a nivel nacional.....	45
Cuadro 4. Peso asignado a los ecosistemas por su representación dentro del SINAP y su estado de conservación actual.....	46
Cuadro 5. Peso asignado a las áreas con probabilidad de presencia del jaguar.....	48
Cuadro 6. Peso asignado a las áreas con diferentes grados de fragmentación en el paisaje...	49
Cuadro 7. Peso asignado a las áreas por su distancia entre caminos y carreteras.....	49
Cuadro 8. Peso asignado a los diferentes tamaños de parche.....	51
Cuadro 9. Peso asignado a las diferentes formas de parche.....	51
Cuadro 10. Peso asignado a los parches con diferente grado de conectividad.....	52
Cuadro 11. Peso asignado a las áreas con diferente grado de complejidad de terreno.....	53
Cuadro 12. Clases de capacidad agrológica de los suelos.....	55
Cuadro 13. Peso asignado a las áreas con mayor potencial para la implementación de SAF por conflicto en uso del suelo.....	56
Cuadro 14. Peso asignado por los expertos (W) a los acuíferos en base a su disponibilidad de agua.....	62
Cuadro 15. Peso asignado a las áreas con diferentes grados de erosión potencial.....	64
Cuadro 16. Peso asignado a las subcuencas por la predominancia del uso de suelo “Bosque”.....	65
Cuadro 17. Tarifas de agua potable en el Estado de San Luis Potosí.....	68
Cuadro 18. Peso asignado por la contribución aproximada de usuarios mayoritarios del agua y su potencial para la compra del servicio en cada acuífero de la SMO dentro de SLP.....	68
Cuadro 19. Peso asignado por la contribución aproximada de usuarios mayoritarios del agua y su potencial para la compra del servicio en cada subcuenca de la SMO dentro de SLP.....	68
Cuadro 20. Peso asignado por la tarifa de agua en cada zona de disponibilidad y el potencial para la compra del servicio.....	70

Cuadro 21. Peso asignado a cada acuífero por la extracción total de agua al año.....	70
Cuadro 22. Peso asignado a cada subcuenca por la extracción total de agua al año.....	71
Cuadro 23. Peso asignado por los expertos (W) para el PSA, a los diferentes tipos de propiedad por el riesgo de deforestación.....	74
Cuadro 24. Peso asignado a las zonas con mayor riesgo de deforestación por su densidad poblacional.....	75
Cuadro 25. Peso asignado a las zonas con mayor riesgo de deforestación con base en la pendiente.....	76
Cuadro 26. Peso asignado a las zonas con mayor riesgo de deforestación con base en la clase de capacidad agrológica.....	77
Cuadro 27. Categorías de nivel de prioridad para el PSA en la SMO.....	81
Cuadro 28. Superficie priorizada para el PSA en la SMO por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.....	83
Cuadro 29. Superficie priorizada para el PSA por la implementación de SAF en la SMO.....	85
Cuadro 30. Superficie priorizada para el PSA por la oferta de agua en la SMO.....	87
Cuadro 31. Superficie priorizada para el PSA por la demanda de agua en la SMO.....	89
Cuadro 32. Superficie priorizada para el PSA por el riesgo de perder los SE en la SMO.....	91
Cuadro 33. Superficie priorizada para el PSA en la SMO por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad.....	93
Cuadro 34. Superficie priorizada para el PSA en la SMO por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos.....	95
Cuadro 35. Superficie priorizada para la conservación por la provisión de SE hidrológicos y derivados de la biodiversidad, en la SMO.....	98
Cuadro 36. Correlación (r) espacial entre indicadores del “output” Mapa de Áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.....	99
Cuadro 37. Correlación (r) espacial entre indicadores del “output” Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua.....	100
Cuadro 38. Correlación (r) espacial entre indicadores de los “outputs” Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua y Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua.....	100

Cuadro 39. Correlación (r) espacial entre indicadores del “output” Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE.....	101
Cuadro 40. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.....	101
Cuadro 41. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias para implementar SAF.....	102
Cuadro 42. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua.....	102
Cuadro 43. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE.....	103
Cuadro 44. Correlación (r) espacial entre outputs.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Método de proceso analítico de jerarquías.....	30
Figura 2. Localización de la Sierra Madre Oriental en San Luis Potosí	32
Figura 3. Pasos para la priorización espacial de áreas para el PSA hidrológicos y derivados de la conservación de la Biodiversidad, en la región fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, S.L.P, México.....	38
Figura 4. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA y los métodos para la asignación de pesos.....	40
Figura 5. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA derivados de la conservación de la Biodiversidad.....	42
Figura 6. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por conservación de la Biodiversidad in situ con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.....	43
Figura 7. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la implementación de SAF con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.....	54
Figura 8. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la provisión de SE hidrológicos.....	60
Figura 9. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la oferta de calidad y cantidad de agua con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.....	61
Figura 10. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la demanda de agua con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios..	66
Figura 11. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por el riesgo de perder los SE con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.....	72
Figura 12. Mapa de áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.....	83
Figura 13. Mapa de áreas prioritarias para implementar SAF	85
Figura 14. Mapa de áreas prioritarias para la oferta de agua	87

Figura 15. Mapa de áreas prioritarias por la demanda de agua.....	89
Figura 16. Mapa de áreas prioritarias por el riesgo de perder los SE.....	91
Figura 17. Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad.....	93
Figura 18. Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE Hidrológicos.....	95
Figura 19. Mapa de áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE.....	97
Figura 20. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias por la provisión de SE derivados de la conservación de la biodiversidad”.....	105
Figura 21. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias para implementar SAF”.....	106
Figura 22. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua”.....	106
Figura 23. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua”.....	107
Figura 24. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE”.....	108

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

SE: Servicios Ecosistémicos

PSA: Pago por Servicios Ambientales

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal

LGDFS: Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable LGDFS

PSAH: Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos

PSA-CABSA: Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad y para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales

LEGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

SAF: Sistema Agroforestal

REPDA: Registro Público de Derechos de Agua

LFD: Ley Federal de Derechos

SIG: Sistemas de Información Geográfica

MCDA: Análisis de Decisión Multicriterio Espacial

SMO: Sierra Madre Oriental

SINAP: Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas

SLP: San Luis Potosí

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

W: Peso asignado por los expertos a criterios e indicadores

OUTPUTS: Mapas finales

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática e importancia del estudio

Se estima que dos terceras partes de los servicios ecosistémicos de los cuales depende el ser humano están degradados y que esta degradación aumentará significativamente en la primera mitad del siglo XXI, lo cual pondrá en riesgo el bienestar de los seres humanos y las metas del desarrollo del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment 2005).

Para contrarrestar esta situación, cada día se acumula más evidencia con respecto a que la adopción de un enfoque en base a los servicios que proveen los ecosistemas puede hacer un desarrollo más sostenible manteniendo la capacidad de la naturaleza para proporcionar dichos servicios (World Resources Institute 2008, Daily 2000).

En América Latina el concepto de Pago por Servicios Ambientales (PSA) ha recibido mucha atención en los últimos años como un instrumento innovador para financiar la conservación de la naturaleza y el buen manejo de los recursos naturales (Pagiola *et al.* 2006, Martínez de Anguita 2006). Dentro de este contexto, en México desde el año 2003 se implementó un programa de PSA que funciona dentro de un esquema a nivel nacional y el organismo encargado de llevar a cabo este programa es la Comisión Nacional Forestal (Diario Oficial de la Federación 2009).

El programa de PSA en México ha tenido un impacto favorable en los terrenos forestales ya que se han conservado e incluso mejorado (Colegio de Posgraduados 2008). Sin embargo, la creación del mercado sigue siendo un reto y se reconoce que la ausencia de información disponible y confiable en diversas regiones del país, limita la posibilidad de mejorar la identificación de zonas elegibles para dicho fin (Colegio de Posgraduados 2008, CONAFOR s.f).

En este sentido, se hace énfasis en que “la evaluación de los servicios ecosistémicos debe generar mejores resultados en la identificación de los sitios donde

estos son producidos, cuantificar la posibilidad de que existe un cambio de uso del suelo y su probable impacto en la provisión del servicio; así como entender el valor de los beneficios derivados de estos servicios a las poblaciones humanas cercanas y distantes” (Naidoo *et al.* 2008). Sin embargo estas acciones requieren de esfuerzos interdisciplinarios extraordinarios para lograr incidir en los tomadores de decisiones (Naidoo *et al.* 2008).

Para responder a este dilema, la cartografía de los ecosistemas en los niveles superiores del espacio, la precisión en su categorización, la exactitud y su vinculación con el flujo de servicios ecosistémicos puede ayudar a los tomadores de decisiones tanto del sector privado y público en su intento por identificar áreas críticas para la prestación de servicios ecosistémicos (Troy y Wilson, 2006), e implementar esquemas o estrategias que aporten al mantenimiento de los mismos.

1.1.1 Justificación del estudio

México es uno de los pocos países en el mundo donde el gobierno ha implementado un esquema de PSA a nivel nacional, sin embargo el territorio mexicano cuenta con 139 millones de hectáreas de bosque por lo tanto la demanda para el PSA excede al presupuesto destinado para estos fines y los beneficiarios siguen viendo estos apoyos como un subsidio más del gobierno, ya que no se ha logrado crear un mercado real entre los dueños de los bosques proveedores del servicio y los beneficiados (Colegio de Posgraduados 2008, CONAFOR-SEMARNAT 2009, CONAFOR s.f).

Dado que México cuenta con una extensión territorial de casi 2 millones de km², los criterios existentes para otorgar el PSA hidrológicos y derivados de la conservación de la biodiversidad, así como las zonas elegibles por la CONAFOR para dicho fin, se basan en un sistema de información geográfica de pequeña escala y en la información que se genera a nivel nacional (CONAFOR-SEMARNAT 2009). Por lo tanto, cada año, la selección de los predios beneficiados para el PSA se lleva a cabo de una manera centralizada y sesgada en muchos sentidos.

Así mismo, se reconoce que la ausencia de información disponible y confiable en diversas regiones del país limita la posibilidad de mejorar en la identificación de zonas elegibles para el PSA a una escala regional o local (CONAFOR s.f.) y que los criterios establecidos para las zonas elegibles requieren ser definidos con más exactitud y rigor; es decir que vayan acorde a su conexión directa con la definición de un mecanismo de PSA y con la lógica de su funcionamiento (Colegio de Posgraduados 2008).

Aunado a esta situación, el desconocimiento del potencial de ciertas regiones para crear un verdadero mercado entre los proveedores y los usuarios del servicio, así como la ausencia de información con respecto a sus recursos naturales, ha propiciado que exista muy poca difusión y conocimiento de estos programas de apoyo gubernamentales, como es en el caso de la Sierra Madre Oriental en el estado de San Luis Potosí.

Con la finalidad de ayudar a los tomadores de decisiones tanto del sector privado y público en su intento por identificar áreas críticas para la prestación de SE, se hace necesario implementar una metodología que permita delimitar espacialmente a una escala regional aquellas zonas donde la provisión, demanda y riesgo de perder los SE considerados por el esquema de PSA sea relevante, de manera que el presupuesto del que dispone el gobierno mexicano para dicho fin sea invertido en aquellas zonas donde éste pueda realmente funcionar como tal.

1.2 Objetivos del estudio

Objetivo general

Contribuir a la identificación de las zonas con mayor valor para la conservación de los servicios ecosistémicos, aplicando una metodología que permita priorizar espacialmente a una escala regional, las áreas para el pago por servicios ambientales hidrológicos y los derivados de la conservación de la biodiversidad, con base en la oferta, demanda y riesgo de perder dichos servicios.

Objetivos específicos

- 1) Identificar espacialmente la oferta relativa de los servicios ecosistémicos Hidrológicos y derivados de la conservación de la Biodiversidad en la región fisiográfica perteneciente a la Sierra Madre Oriental en el Estado de San Luis Potosí, México.
- 2) Identificar espacialmente la demanda relativa de dichos servicios ecosistémicos.
- 3) Identificar espacialmente el riesgo y la amenaza relativa para la provisión de dichos servicios ecosistémicos.
- 4) Identificar las áreas prioritarias para la conservación y el pago por servicios ambientales en la Región fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, San Luis Potosí, México.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Los servicios de los ecosistemas y la valoración del ambiente

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment 2005) define a los servicios de los ecosistemas (o servicios ambientales) como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y Quétier *et ál.* (2007) por su parte agregan que estos contribuyen a hacer la vida no sólo físicamente posible sino también digna de ser vivida. Es decir toda la vida humana no solo depende de los servicios de los ecosistemas para las necesidades fundamentales, sino que también puede lograr a través de ellos relaciones sociales satisfactorias y la libertad de elección y acción.

Los servicios ecosistémicos (SE) se clasifican en cuatro grandes grupos (Millennium Ecosystem Assessment 2005):

- *De aprovisionamiento:* Bienes producidos o proporcionados por los ecosistemas como alimentos, agua limpia, combustibles, madera, fibra, recursos genéticos, medicinas naturales y otros.
- *De Regulación:* Servicios obtenidos de la regulación de los procesos ecosistémicos como la calidad del aire, regulación del clima, regulación hídrica, control de erosión, mitigación de riesgos, regulación de las enfermedades, control biológico y la polinización.
- *Culturales:* Beneficios no materiales que enriquecen la calidad de vida, tales como la diversidad cultural, los valores religiosos y espirituales, conocimiento – tradicional y formal–, inspiración, valores estéticos, relaciones sociales, sentido de lugar, valores de patrimonio cultural, recreación y ecoturismo.
- *Apoyo:* Servicios necesarios para producir todos los otros servicios, incluida la producción primaria, la formación del suelo, la producción de oxígeno, retención de suelos, ciclaje de nutrientes y otros.

La provisión de servicios ecosistémicos puede darse en forma directa como es el caso de aquellos relacionados al consumo como los alimentos, fibras, medicamentos y

otros; o los que no tienen fines de consumo como el ecoturismo. O en forma indirecta, a través de la influencia en los procesos de los ecosistemas que son esenciales para la vida, tales como la dinámica de la energía, dinámica del agua, transferencia trófica, polinización, dispersión de semillas, regulación de las condiciones climáticas adecuadas para seres humanos, animales y plantas, el control de plagas agrícolas, la regulación de la salud humana, etc (Norberg 1999, Daily 2000, Diaz y Duffy 2006).

Desde hace mucho tiempo, los ecologistas siempre han sabido que la naturaleza provee los servicios que mantienen la vida en la tierra en virtualmente cualquier escala, que muchos servicios no tienen un precio en el mercado y que muchos de estos servicios son irremplazables por la tecnología (Costanza *et al.* 1997). Por lo tanto un servicio ambiental es utilizado para entender que la estructura y función de la naturaleza tiene un valor si las funciones de los ecosistemas pueden redefinirse como “los servicios y bienes ambientales” cuando se considera el valor que tienen para los seres humanos (Limburg *et al.* 2002, de Groot 2006).

Debido a que la relación entre los efectos de políticas ambientales específicas y la satisfacción de las preferencias humanas no es completamente entendible, la relación entre el manejo de la tierra y la provisión de servicios ambientales no es completamente conocida (medible) y su estimación es necesaria para poder establecer un sistema de PSA (Campos *et al.* 2005).

Cuando se trata de darle un valor al ambiente, generalmente las políticas ambientales se basan en valores de sistemas mixtos, estos sistemas consideran un valor intrínseco en la naturaleza (por eso se desea cuidar de una manera sostenible) y un valor instrumental (en la medida que estos satisfacen las preferencias humanas) (Farber *et al.* 2002).

La fragilidad de los ecosistemas es entonces importante cuando los humanos dependen de estos servicios, no cuando solamente se refiere al sistema natural por sí mismo. Por esta razón es necesario para las políticas de manejo de los ecosistemas no solamente medir la magnitud de la provisión de los servicios ambientales sino también la fragilidad de los ecosistemas (Farber *et al.* 2002).

2.2 El Pago por Servicios Ambientales (PSA)

El Pago por Servicios Ambientales (PSA) es un mecanismo flexible y adaptable a diferentes condiciones, que apunta a un pago o compensación directa por el mantenimiento o provisión de un servicio ambiental por parte de los usuarios del servicio del cual se destina a los proveedores (Pagiola *et al.* 2006).

A diferencia de los sistemas de incentivos, los PSA se basan en una clara relación entre los usuarios y los proveedores de un servicio bien definido. Por lo tanto, la idea fundamental de los sistemas de PSA es crear un mercado para un servicio ambiental que habitualmente no tiene precio ya que el sistema parte de la identificación de agentes económicos responsables de la externalidad ambiental positiva, los proveedores del servicio y de los agentes beneficiados o usuarios (Landell Mills 2002, DE HEK *et al.* 2004 en Pagiola *et al.* 2006).

Es un hecho que los PSA están ocupando un nicho de políticas públicas importante en la solución de los problemas ambientales que enfrentamos. Sin embargo algunos sectores de la sociedad se muestran preocupados por las implicaciones profundas de poner un precio a la naturaleza ya que hasta el momento esta acción presenta verdaderos problemas técnicos y levanta serias objeciones culturales (Pagiola *et al.* 2006).

Aunque la valoración de las externalidades (costos o beneficios generados a terceros y que no son tomados en cuenta en los precios del mercado) y la creación de mecanismos derivados de estas, son únicamente una herramienta más, que si bien no constituyen la solución a una región, son sistemas que en determinadas circunstancias y desde un planteamiento responsable y solidario, pueden contribuir a reducir la pobreza rural y dotar de servicios y bienes ambientales a una población (Landel Mills 2002, Martínez de Anguita 2006).

De esta manera, en el diseño de la estrategia de política pública para proteger los servicios ambientales, encontramos tres opciones básicas (Pagiola *et al.* 2006):

1.- Apoyar el surgimiento de mercados privados, un ejemplo de este enfoque es el ecoturismo, el café de sombra certificado, proyectos de bonos de captura de carbono, los contratos de servidumbres ecológicas, comprar los derechos a cambiar la vegetación natural, etc.

2.- Recibir transferencias de los beneficiarios globales, por ejemplo los apoyos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés).

3.- Actuar como intermediarios, cobrando a los beneficiarios locales y pagando a los propietarios de los bosques.

Esta tercera opción es deseable cuando el servicio ambiental es un bien público a nivel local o regional como son los servicios ambientales relacionados con el agua y en algunos casos con la conservación de la biodiversidad.

2.3 El Pago por Servicios Ambientales en México

2.3.1 El esquema de PSA en México

México y Costa Rica son los únicos países en América con un esquema de Pago por Servicios Ambientales (PSA) a nivel nacional. En México, el organismo encargado de llevar a cabo el PSA es la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) la cual fue creada el 4 de Abril del 2001 (CONAFOR 2010a), y cuyo objetivo es favorecer e impulsar las actividades productivas de protección, conservación y de restauración en materia forestal, que conforme a la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (decretada el 25 de febrero de 2003) se declaran como un área prioritaria del desarrollo, así como participar en la formulación de los planes y programas y en la aplicación de la política de desarrollo forestal sustentable y sus instrumentos (Diario Oficial de la Federación 2003a).

En la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) se define a los servicios ambientales como “Los que brindan los ecosistemas forestales de manera natural o por medio del manejo sustentable de los recursos forestales, tales como: la

provisión del agua en calidad y cantidad; la captura de carbono, de contaminantes y componentes naturales; la generación de oxígeno; el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; la modulación o regulación climática; la protección de la biodiversidad, de los ecosistemas y formas de vida; la protección y recuperación de suelos; el paisaje y la recreación, entre otros” (Diario Oficial de la Federación 2003a).

A partir del 2003 la CONAFOR creó el Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) y un año después, en 2004 se creó el Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad y para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA) (Diario Oficial de la Federación 2009). Aunque a partir del año 2010, la CONAFOR retiró la modalidad de Pago por servicios ambientales por Captura de Carbono¹, quedando únicamente las modalidades para: 1) Servicios ambientales hidrológicos y 2) Derivados de la Biodiversidad (incluyendo el establecimiento y mejoramiento de Sistemas Agroforestales) (Diario Oficial de la Federación 2009, Orta-Salazar 2010²).

Ambos programas de PSA se rigen bajo las Reglas de Operación de ProÁrbol y por este medio el gobierno federal otorga una compensación económica por un plazo de 5 años a los dueños y poseedores de bosques y selvas del país que deciden conservar sus áreas forestales para proveer diversos servicios ambientales a la sociedad (Orta-Salazar 2010², Diario Oficial de la Federación 2009).

Desde su comienzo en México, el PSA ha sido financiado a través de diversos mecanismos, estos han sido: 1) Presupuesto de Egresos de la Federación; 2) Impuestos a los usuarios mayoritarios del agua; 3) El Banco Mundial y 4) El Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) (Diario Oficial de la Federación 2003b, CONAFOR 2010b).

¹ Debido a que la situación de los bosques y el Cambio Climático son considerados problemas de seguridad nacional, el gobierno mexicano está preparando un programa intersectorial para Reducir las Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques (REDD) para que a través de este mecanismo se financien los proyectos y estrategias para mitigar el calentamiento global y no se dependa únicamente de los recursos asignados por la CONAFOR.

² Orta-Salazar C. 2010. Servicios Ambientales del Bosque (Comunicación personal). CONAFOR-Delegación San Luis Potosí, México.

Los recursos aportados por estas fuentes de financiamiento son depositados en el Fondo Forestal Mexicano, el cual surgió como un instrumento para promover la conservación, incremento, aprovechamiento sustentable y restauración de los recursos forestales y sus recursos asociados facilitando el acceso a los servicios financieros en el mercado, impulsando proyectos que contribuyan a la integración y competitividad de la cadena productiva y desarrollando los mecanismos de PSA (Diario Oficial de la Federación 2003b, CONAFOR 2010b).

El esquema de PSA mexicano, lo que trata es obtener el máximo beneficio ambiental en la selección de predios a través de una serie de criterios (Pagiola *et al.* 2006). Entre los criterios que tiene CONAFOR para seleccionar los predios (terrenos) beneficiados para PSA en ambas modalidades (Hidrológicos y Biodiversidad) se encuentran (Diario Oficial de la Federación 2009):

- Estar dentro de un Área Natural Protegida.
- Estar dentro de las 60 montañas prioritarias para CONAFOR.
- Estar dentro de la microcuenca donde haya una zona elegible para PSA.
- Estar conformado por un comité de vigilancia acreditado por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).
- Si el predio se une con otros predios para formar corredores biológicos.
- Si demuestra que un usuario de los servicios ambientales pagará por estos.
- Si tiene un predio con Ordenamiento Territorial Aprobado.
- Si se encuentra en una zona con riesgo de deforestación.
- Si contiene alta densidad de biomasa.

Además de otros criterios específicos para cada modalidad (mayor detalle en Reglas de Operación ProÁrbol, Diario Oficial de la Federación 2009).

2.3.2 Debilidades del esquema de PSA en México

México cuenta con 139 millones de hectáreas de bosque de las cuales únicamente 25.03 millones son elegibles para PSA por servicios hidrológicos y 38.09 millones para la conservación de la Biodiversidad (CONAFOR-SEMARNAT 2009). Al igual que en otros países con esquemas de PSA a nivel nacional (como Costa Rica), el presupuesto disponible para el Pago por Servicios Ambientales no es suficiente para cubrir la demanda en todo el país (CONAFOR s.f., Orta-Salazar 2010²).

El 89% de la superficie apoyada, distribuida en 31 estados de la república corresponde a la modalidad de PSA por servicios hidrológicos, el resto se distribuye para los sistemas agroforestales y la conservación de la biodiversidad (Colegio de Posgraduados 2008). CONAFOR da prioridad a la modalidad de servicios hidrológicos debido a que es el servicio con mayor probabilidad de mercado en México (Orta-Salazar 2010²) y gran parte del financiamiento para PSA ha proveniendo de los impuestos a los usuarios mayoritarios del agua, un pago por derecho al agua que establece la Ley Federal de Derechos en su artículo 223³ (Diario Oficial de la Federación 2003b).

Sin embargo, los impuestos recaudados de los usuarios mayoritarios del agua son depositados en el Fondo Nacional Forestal, de donde se distribuyen a diferentes regiones del país, sin considerar específicamente la cuenca hidrológica de la cual haya proveniendo la mayor cantidad de usuarios y por lo tanto la mayor cantidad de dinero; es decir, el PSAH no considera a los usuarios del recurso en cada cuenca ni las posibilidades de lograr un mercado real de PSA entre los dueños de los bosques y los beneficiados de sus servicios.

³ Cada año, de los ingresos que se obtienen por la recaudación de los derechos por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales por usuarios distintos de los municipales y organismos operadores de los mismos; 300 millones de pesos tienen destino específico para el Fondo Forestal Mexicano para el desarrollo y operación de Programas de Pago por Servicios Ambientales.

Algunos expertos no recomiendan cambiar los criterios vigentes para las zonas elegibles de PSA, sino definirlos con más exactitud y rigor, es decir que vayan acorde a su conexión directa con la definición de un mecanismo de PSA y con la lógica de su funcionamiento, pues a pesar de contar con estos criterios, se tiene la tendencia de emplear estos apoyos como un mecanismo para combatir la pobreza y desigualdad de género, siendo que esos no son los fines que se persigue con un PSA (Colegio de Posgraduados 2008).

En México la mayoría de los beneficiarios de PSA consideran que el programa ha tenido un impacto favorable en sus terrenos forestales ya que se han conservado o incluso han mejorado (Colegio de Posgraduados 2008). Sin embargo, la creación del mercado sigue siendo un reto debido a que desde el comienzo del programa hasta el momento, únicamente 20% del total de los beneficiarios ha establecido alguna relación con compradores potenciales de los servicios. Aunado a esto se tiene que en el esquema de PSA, ni la directriz firme de sus objetivos están garantizados debido a la deficiencia en su legislación y las fluctuaciones en las corrientes políticas sexenales (Colegio de Posgraduados 2008).

Aunque la CONAFOR ha definido los criterios para otorgar el Pago por Servicios Ambientales, estos criterios y la identificación de áreas elegibles se ha basado en cartografía de pequeña escala (1:250,000) (CONAFOR-SEMARNAT 2009). Si bien gran parte de la información que dispone CONAFOR es generada por instituciones gubernamentales y académicas de prestigio, se reconoce que la ausencia de información disponible y confiable en diversas regiones del país, limita la posibilidad de mejorar en la identificación de zonas elegibles para el PSA a una escala regional o local (CONAFOR s.f.).

2.4 Biodiversidad

En México, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LEGEEPA) define a la biodiversidad como “la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la

diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas” (Diario Oficial de la Federación 1988).

El pago por servicios ambientales que otorga la CONAFOR para conservación de la biodiversidad se destina por concepto de “Conservar la flora y fauna silvestre en sistemas forestales y sistemas agroforestales con cultivos bajo sombra” (Diario Oficial de la Federación 2009).

Al igual que la mayoría de los recursos naturales, la medida y el valor de la biodiversidad dependen del sitio en el que ésta se encuentre, sin embargo, al contrario de la protección de las cuencas, los beneficiarios o consumidores de la biodiversidad a menudo están muy dispersos (Landell Mills 2002). Por lo que una forma de darle valor a la biodiversidad es simplemente su valor de existencia, lo cual representa el material genético natural y los procesos y bienes derivados de su conservación (Pagiola *et al.* 2006).

2.4.1 Conservación de la Biodiversidad a nivel de paisaje

México es considerado uno de los principales países megadiversos del planeta. Debido a su localización entre las dos grandes regiones biogeográficas neártica y neotropical, el país alberga el 10% de la biodiversidad terrestre del planeta y presenta un alto índice de endemismos (Mittermeier y Goettsch 1992).

En épocas pasadas la biodiversidad era vista solamente en términos de riqueza de especies y los ecosistemas que mantenían estas especies eran vistos como estáticos y predecibles, las actividades de conservación eran dirigidas hacia la riqueza de hotspots enfocándose en el total de especies o rareza de las mismas. Sin embargo en las últimas décadas la biodiversidad comenzó a ser vista más expansivamente al incluir desde genes, especies, poblaciones, comunidades, ecosistemas y paisajes, con cada nivel de organización biológica exhibiendo características de composición, estructura y función complejas (Noss 1990).

La pérdida y fragmentación de hábitats se reconoce en todo el mundo como un problema clave con el que se enfrenta la conservación de la diversidad biológica. A

medida que aumenta la población mundial va quedando cada vez menos superficie de la tierra que no se vea afectada por interferencias humanas. El proceso de fragmentación tiene tres componentes reconocibles (Bennett 2004): 1) pérdida general del hábitat en el paisaje; 2) disminución en el tamaño de los segmentos de hábitat y; 3) aislamiento de hábitats.

Por esta razón las recomendaciones actuales para la conservación de la biodiversidad se enfocan en la necesidad de conservar los dinámicos patrones ecológicos a multiescala de manera que sustenten un complemento de la biota y los sistemas naturales que la mantienen (Poiani *et al.* 2000).

2.4.2 Priorización de áreas para la conservación de la biodiversidad

La conservación de la biodiversidad requiere entre otras cosas la identificación de zonas que deberían incluirse en un sistema nacional o regional de áreas naturales protegidas (Crist 2000).

Ferrier (2002) expone que para poder identificar dichas áreas, debería conocerse la distribución espacial de los componentes de biodiversidad. Sin embargo, debido a que esta labor es usualmente compleja e incompleta, los esfuerzos para la conservación de la biodiversidad hacen que las entidades encargadas de esta labor recurran a lo que se conoce como información distribucional o como los sustitutos de patrones espaciales de biodiversidad.

En años recientes organizaciones conservacionistas han desarrollado algunos enfoques con la finalidad de priorizar áreas importantes para la conservación, algunos de estos métodos son (Redford *et al.* 2003):

- 1) Identificación de “puntos calientes” (*hotspots*) o áreas con características excepcionales de concentración de especies endémicas y que experimentan una excepcional pérdida de hábitat.

- 2) Análisis *GAP* o de vacíos de conservación en el cual se trata de identificar las especies y comunidades vegetales que no están adecuadamente representadas en los sistemas actuales de áreas protegidas.
- 3) Identificación de Bosques de Alto Valor para la Conservación, esta es una herramienta para determinar la importancia para la conservación de las unidades de manejo forestal.
- 4) La localización de áreas importantes para la conservación de las aves (AICAS).

Así mismo, existen diferentes métodos para mapear clases terrestres discretas como sustitutos de la distribución de la biodiversidad entre ellos dentro de la ecología del paisaje se tienen:

- 1) Mapeo de la heterogeneidad de hábitats: Los hábitats con condiciones abióticas heterogéneas tienen más nichos diversos potenciales. Por ejemplo las variaciones de estructura física pueden ser usadas para mapear la distribución de la riqueza de especies de plantas (eje. apariencia, drenaje o textura) (Honnay *et al.* 2002).
- 2) Aislamiento, tamaño y forma de los parches: En paisajes fragmentados, la distancia entre los hábitats potenciales determinan la riqueza y composición de especies. De esta misma forma, los parches irregulares poseen más gradientes ambientales y por lo tanto más especies, así mismo, entre mayor sea el tamaño del parche, presentará un mayor número de especies (Turner *et al.* 2001, Honnay *et al.* 2002, Bennett 2004).
- 3) Heterogeneidad escénica: la composición del paisaje combinada con parches de diferentes formas y tamaños bajo manejo natural o humano tienen un efecto considerable en la distribución de la biodiversidad (Turner *et al.* 2001, Honnay *et al.* 2002).
- 4) Complejidad del terreno: La elevación, pendiente, el aspecto y los materiales parentales afectan el aire, la temperatura del suelo, la cantidad de nutrientes, etc.,

por eso se relacionan fuertemente con la distribución de la vegetación. Se asume que conforme el terreno es más complejo, este tiene diferente exposición al sol, humedad y vegetación, por lo tanto indica mayor diversidad de hábitats (Turner, *et al.* 2001).

La combinación de ambas estrategias (la interpolación de especies y taxas con el mapeo de clases terrestres discretas) dan origen a un tercer acercamiento el cual es conocido como “filtro fino/filtro grueso”. Esta aproximación mitiga en algo la falla en la amplitud del rango de los supuestos de “especies y taxas” y en la baja correlación con la distribución real de la biodiversidad de los supuestos de las “clases terrestres discretas” (Ferrier 2002).

2.4.3 La función de los Sistemas Agroforestales en la conservación de la Biodiversidad

Aunque las áreas protegidas son y se mantendrán como una estrategia central de conservación, es probable que solo puedan asegurar la sobrevivencia a largo plazo de una pequeña fracción de la biodiversidad de la tierra ya que son áreas demasiado pequeñas, muy pocas, aisladas y vulnerables, afectadas por los cambios en el paisaje circundante (Harvey y Sáenz 2008). La mayor parte de las reservas para la conservación se están encontrando cada vez más rodeadas de ambientes intensamente modificados y a largo plazo parecen destinadas a funcionar como ecosistemas naturales aislados (Bennet 2004).

En este sentido, la importancia del manejo de la biodiversidad en paisajes de uso agropecuario o “agropaisajes”, radica en el conocimiento y la integración de los agricultores en el tema. Por esta razón, será clave pensar de forma creativa acerca de cómo conservar la biodiversidad dentro de los “agropaisajes” manejados por el ser humano, buscar nuevos enfoques que reconcilien las necesidades de la producción agrícola con las metas de conservación y utilizar nuevos métodos y herramientas para conservar la biodiversidad tanto a escala de paisaje, como a escala regional (Harvey y Sáenz 2008).

Un Sistema Agroforestal (SAF) es una forma de cultivo múltiple donde: existen al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente, al menos uno de los componentes es una leñosa perenne y al menos uno de los componentes es una planta manejada con fines agrícolas o pecuarios (Somarriba 1990). El grado en que los SAF pueden servir a los esfuerzos de conservación depende de su diversidad florística y estructural. En general, entre más diverso sea el SAF, menor su intensidad de manejo y más cercano esté al hábitat intacto, mayor será su capacidad para conservar especies nativas de plantas y animales (Beer *et al.* 2003).

Acorde a diversos autores (Beer *et al.* 2003 y Jose 2009) los principales servicios ambientales que pueden proveer los SAF son: 1) el mantenimiento de la fertilidad del suelo/reducción de la erosión mediante el aporte de material orgánico al suelo, fijación de nitrógeno y reciclaje de nutrientes; 2) conservación del agua (cantidad y calidad) al favorecerla infiltración y reducir la escorrentía superficial que podría contaminar cursos de agua; 3) captura de carbono, enfatizando el potencial de los sistemas silvopastoriles; y 4) conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados. Estos servicios complementan los productos que los SAF proveen (para uso comercial o familiar; p. ej., leña, madera, frutos) pero rara vez los agricultores son recompensados por ellos.

Los SAF pueden proveer hábitat y recursos para especies de plantas y animales, mantienen la conectividad en el paisaje (y de esta manera facilitan el movimiento de animales, semillas y polen), hacen que el paisaje sea menos severo para las especies forestales al reducir la frecuencia e intensidad de incendios, disminuyen los efectos de bordes en los fragmentos forestales remanentes y amortiguan áreas protegidas (Schroth *et al.* s.f. en Beer *et al.* 2003).

Es muy importante señalar que los SAF no pueden proveer los mismos nichos ni hábitats que proveen los bosques originales y no deben ser promovidos como una herramienta de conservación a expensas de la conservación del bosque natural. Los SAF son una herramienta complementaria para la conservación y deben ser incorporados en el manejo de los paisajes para conservar y proteger los fragmentos de bosque remanentes, aumentar la cobertura arbórea en las fincas y amortiguar y conectar las áreas protegidas (Beer *et al.* 2003).

2.5 Servicios Hidrológicos

En México, la Ley de Aguas Nacionales define a los servicios ambientales como “los beneficios de interés social que se generan o se derivan de las cuencas hidrológicas y sus componentes, tales como regulación climática, conservación de los ciclos hidrológicos, control de la erosión, control de inundaciones, recarga de acuíferos, mantenimiento de escurrimientos en calidad y cantidad, formación de suelo, captura de carbono, purificación de cuerpos de agua, así como conservación y protección de la biodiversidad”; para la aplicación de este concepto, en esa Ley se consideran primordialmente los recursos hídricos y su vínculo con los forestales (Diario Oficial de la Federación 1992).

El Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) se otorga por concepto de “Conservar la cobertura boscosa, la recarga de acuíferos y manantiales así como evitar la erosión del suelo” (Diario Oficial de la Federación 2009) y fue diseñado para apoyar a los bosques no comerciales (Pagiola *et al.* 2006). Sin embargo, aunque el PSAH tiene el objetivo de proteger las fuentes de agua, menos del 5% de la superficie incorporada en el programa está ubicada en las zonas de mayor escasez de agua. Y aunque se quiere conservar el bosque amenazado, la mayoría del área incorporada al programa tiene un bajo o muy bajo riesgo de deforestación (Pagiola *et al.* 2006).

A pesar de las debilidades en el esquema de PSAH que ofrece la CONAFOR, en México hay aceptación política de cobros al agua con destino específico para la conservación de los bosques en la cuenca que provee los servicios hidrológicos. Un ejemplo de este tipo de estrategia que se ha puesto en práctica es el programa local de PSA en Coatepec, Veracruz (Pagiola *et al.* 2006, Manson 2004, Muñoz *et al.* 2005).

2.5.1 Relación entre la cobertura forestal y la calidad-cantidad de agua

Cada vez se asocia más a los bosques con una diversidad de servicios ambientales prestados en las cuencas hidrológicas. Los ecosistemas forestales contribuyen a regular los flujos de agua en las cuencas y reducen los sedimentos en las vías de aguas y en los embalses (Bosh y Hewlett 1982, Guo *et al.* 2000).

Entre los pocos estudios que se conocen en México sobre la relación entre el bosque y los servicios hidrológicos, se ha visto que los Bosques Mesófilos de Montaña del estado de Veracruz son responsables de una porción muy importante de los flujos de agua superficial en época de secas y neblina; por otra parte se ha encontrado evidencia de la importancia del servicio de la cobertura forestal en la reducción de los riesgos de deslaves de las crestas en las Sierras cubiertas por selvas bajas de la Costa de Jalisco; y finalmente un estudio realizado en la Sierra Gorda de Querétaro, demostró que los bosques en esta zona son fundamentales en la recarga de los acuíferos que abastecen a las ciudades de Querétaro y San Juan del Río (García Coll 2002, Burgos 1999 y Carrillo 2002; citados por Muñoz *et al.* 2005).

De acuerdo con Bruijnzeel (en UNESCO 2002), los suelos forestales actúan como esponjas para el agua de lluvia, permitiendo su lenta filtración hacia el subsuelo y la recarga de los mantos acuíferos, lo que se puede asociar con protección de la calidad del agua y regulación de flujos. La remoción de bosques, particularmente en las partes altas de la cuenca, interrumpe la captación del agua y detiene la recarga de los mantos acuíferos, lo que puede resultar en el aumento de ciclos de inundaciones y sequías.

Se ha encontrado que en cuencas deforestadas aumenta el flujo del agua significativamente en los ríos, así como la rapidez a la cual se eleva el nivel de los ríos justo después de una tormenta, lo cual contribuye de manera importante al riesgo de inundaciones (Bosh y Hewlett 1982).

Así mismo, los servicios ecosistémicos hidrológicos de los bosques tropicales, tales como, la reducción de la sedimentación, reducción de caudales máximos, conservación de caudales mínimos y el agua total en la cuenca contribuyen a la sostenibilidad del sector hidroeléctrico (Millenium Ecosystem Assessment 2005).

Se calcula que globalmente existe un promedio anual en la reducción de la capacidad de almacenamiento de los reservorios de agua debido al arrastre de sedimentos entre el 0.5 y 1 % (Rodney 2000). Los sedimentos también degradan la infraestructura de dichos reservorios debido a la abrasión y bloqueo de las salidas de agua, lo cual afecta las actividades localizadas aguas abajo e incrementa el riesgo a desastres (Palmieri *et al.* 2003).

Por otro lado, aunque a menudo se cree que los bosques ayudan a proporcionar servicios hidrológicos, el conocimiento de los vínculos entre los bosques y dichos servicios es en algunos casos, deficiente (Kaimowitz 2001), ya que los pocos estudios detallados existentes, revelan que los impactos de los bosques en la cantidad y calidad de agua, erosión, sedimentación, niveles freáticos y productividad acuática dependen de muchas características específicas al sitio, incluyendo el terreno, la composición del suelo, las especies arbóreas, la mezcla de vegetación, el clima y los regímenes de manejo (Calder 2002).

Sin embargo, cualquiera que fuere la naturaleza específica de los vínculos entre los bosques y los servicios hidrológicos, el problema fundamental es que estos servicios generalmente son aprovechados por personas que están lejos de los bosques que se los proporcionan (Pagiola *et al.* 2006).

2.5.2 Usos del agua

El agua para consumo humano, riego y transporte siempre ha tenido prioridad sobre otros servicios hidrológicos que benefician a la sociedad, los demás servicios han adquirido importancia recientemente (tales como el agua para uso industrial o generación de electricidad). Hasta ahora se entiende que los ecosistemas acuáticos proveen de bienes y servicios a corto plazo como son: la provisión de agua potable, abastecimiento de comida, control de escurrimientos, la purificación de ciertos contaminantes, además de ser el hábitat de muchas plantas y animales; y a largo plazo, es decir, sustentando la provisión de dichos bienes y servicios, así como la capacidad de adaptarse a los disturbios ambientales (Baron *et al.* 2002)

En México, en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), se tienen registrados los volúmenes concesionados(o asignados) a los usuarios de aguas nacionales, agrupándose para fines prácticos en usos consuntivos (agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida y termoeléctricas) y no consuntivos (hidroeléctricas). El 77% del volumen de agua que se consume a nivel nacional es para uso agrícola, el 14% para abastecimiento público, el 5% para termoeléctricas y el 4% es para uso industrial (CONAGUA 2008).

Los lagos, lagunas, acuíferos y ríos son considerados propiedad de la nación y son administrados por el gobierno federal. El gobierno federal cobra por el aprovechamiento de los bienes de la nación a través de la Ley Federal de Derechos (LFD). Dicha Ley en sus artículos 222, 223 y 224 establece las tarifas que pagan diferentes tipos de usuarios del agua, las cuales se pueden resumir de esta manera: los agricultores no pagan nada, los municipios muy poco y las tarifas más altas son para el resto de los usuarios, principalmente empresas manufactureras (industrias) y de servicios (mayores detalles en la LFD, Diario Oficial de la Federación 2003b).

De acuerdo con Pagiola *et al.* (2006), existen cinco grupos principales de beneficiarios del servicio agua: 1) Los generadores de energía eléctrica; 2) Los sistemas municipales de distribución de agua para consumo humano; 3) Los sistemas de irrigación; 4) Los usuarios industriales; 5) La población de zonas propensas a inundaciones. De estos, únicamente los primeros cuatro son candidatos como compradores del servicio.

2.5.3 Cantidad y calidad del agua en México

En México, al igual que en muchos otros países, la problemática de la calidad del agua está asociada a múltiples factores (usos urbanos, agrícolas, industriales, etc). Se tiene que en el país se generan alrededor de 420 m³ por segundo de descargas de aguas residuales; de estas las municipales generan 250 m³/s y las no municipales generan el resto (170 m³/s). La mayor cantidad de volumen es generada por la acuicultura, la industria del azúcar, la industria del petróleo, la industria química y otros servicios (aunque la acuicultura prácticamente no aporta contaminación) (INE 2007).

En cuanto a la calidad del agua superficial en todo el país se tiene que: la proporción de calidad del agua aceptable para cualquier tipo de uso es el 5%, lo cual representa una pequeña cantidad de cuerpos de agua; la aceptable es del 22%; el agua poco contaminada representa un 49%; la contaminada 15% y la altamente contaminada 7% e incluso se tiene presencia de tóxicos en 2% pero no es una cosa generalizada en el país afortunadamente (INE 2007).

Con respecto a la contaminación del agua subterránea en México, los acuíferos (profundo y somero) pueden presentar contaminación debido principalmente a: 1) causas naturales, como la intrusión de agua de mar o cuando presentan elementos derivados de la composición química del sustrato geológico como flúor o arsénico; 2) la infiltración de escurrimientos con contaminantes derivados de las actividades antropogénicas (COTAS 2005, INE 2007).

La república mexicana presenta una notable desigualdad en la distribución del recurso hídrico ya que el 80% del agua en el país se encuentra en la zona sur y sureste (debajo de los 500 msnm), mientras que únicamente el 5% se encuentra en las planicies más altas que corresponde con el centro, norte y noroeste del país (las zonas más áridas), donde se encuentra cerca de un tercio de la población y dos tercios de la producción industrial (CONAGUA 2008).

Además de la escasez de este elemento vital en dichas zonas, el crecimiento de la actividad industrial en el país, ha traído como consecuencia la contaminación de prácticamente todas las cuencas hidrológicas que sirven a los centros urbanos (Athié-Lambarri 1987).

2.6 Riesgo y amenazas de perder los SE

Acorde a diversos autores (Angelsen y Kaimowitz 1999, Lambin *et al.* 2001, Millenium Ecosystem Assessment 2005), la magnitud y los alcances espaciales de las alteraciones del hombre en la superficie de la tierra no tienen precedentes. Siendo los cambios en la cobertura del suelo y su uso, las causas principales de estas alteraciones.

Los efectos del uso de la tierra y los cambios en la cobertura son tan generalizados que cuando se agregan globalmente afectan significativamente aspectos clave en el funcionamiento del sistema terrestre como son: la diversidad biológica en todo el mundo; contribuyen al cambio del clima local y regional así como al calentamiento global; son la causa principal de la degradación del suelo; y al alterar las funciones de los ecosistemas afectan la habilidad de los sistemas biológicos de mantener las necesidades humanas. Además dichos cambios también determinan en

parte la vulnerabilidad de los lugares y la gente a las perturbaciones climáticas, económicas y socio-políticas (Lambin *et al.* 2001, Angelsen y Kaimowitz 1999)

2.6.1 Deforestación

Una de las primeras causas del cambio global es la deforestación, pero la pregunta sobre cuáles son los factores que causan la deforestación son diversos. Existen muchos argumentos que explican las causas subyacentes de deforestación, pero la evidencia empírica aún presenta problemas con el análisis estadístico entre países, el cual está en algunos casos asociado con incertidumbres sobre las tasas de deforestación y los factores que influyen en la deforestación ya que las interacciones entre ellos y la magnitud de sus efectos varían significativamente de un lugar a otro (Geist y Lambin 2001, Angelsen y Kaimowitz 1999).

En un esfuerzo por tratar de explicar las principales causas que conllevan a la deforestación, Geist y Lambin (2001) hacen un análisis global con un enfoque subnacional intentando encontrar patrones. Los resultados se desglosan en tres causas próximas de deforestación: la expansión agrícola, la extracción de madera y la expansión de la infraestructura; y en cinco causas de deforestación generales: demográficas, económicas, tecnológicas, políticas o institucionales y culturales. A todas estas causas se suman otros factores ambientales (calidad del suelo, topografía, fragmentación del bosque, etc), biofísicos (disturbios como incendios, sequías, pestes, etc) y disturbios sociales (guerras, revoluciones, desplazamientos abruptos, shocks económicos, cambios abruptos en políticas, etc).

En México se deforestan anualmente 631,000 ha y se estima que ha perdido el 50% de su cobertura forestal durante los últimos 20 años por lo que actualmente se ubica dentro de las tasas de deforestación más altas del planeta. (FAO 2005). Las principales causas de degradación de los bosques en México se atribuyen a incendios y plagas, tala clandestina y robo de madera en pie, pero la causa principal de deforestación son los cambios de uso de suelo motivados por su mayor rentabilidad en usos de la tierra agropecuarios o urbanos (INE 2009).

Existe una correlación entre la pérdida de cobertura forestal y la cercanía a poblaciones. Así mismo se observa que existe mayor deforestación en zonas con poca pendiente y en suelos y climas relacionados con medios y altos rendimientos agrícolas (INE 2009). La dimensión de la propiedad de la tierra también es importante para explicar la deforestación ya que en México entre el 60 y 80% de los bosques tienen un tipo de propiedad comunal o ejidal (INE 2009).

La otra característica fundamental de los bosques y selvas en México es que en su gran mayoría, son propiedad colectiva de personas que viven en pobreza extrema. Así mismo, los altos niveles de pobreza representan un reto para la sustentabilidad pues hacen que los propietarios del bosque tengan horizontes muy cortos de planeación. Por otra parte, la balanza de rentabilidad de usos del suelo se inclina en contra de la silvicultura debido a que es una actividad con recuperación de inversiones a largo plazo y se inclina a favor de la agricultura y ganadería que representan beneficios a corto plazo (INE 2009).

2.6.2 Contaminación

La contaminación del medio ambiente representa una amenaza para la provisión de SE. Los contaminantes pueden ser liberados a la atmósfera en forma de gases o disueltos en el agua o suelo. De esta forma, las fuentes de contaminación se dividen en dos grandes grupos: fuentes fijas y fuentes no fijas (Meybeck y Helmer 1996).

Indudablemente el agua utilizada para consumo humano debe cumplir ciertos estándares de calidad por lo que la identificación de las fuentes fijas de contaminación y sus efectos en la calidad del agua es el método más comúnmente utilizado para resolver los problemas de contaminación (Harrison 1998).

Acorde a Meybeck y Helmer (1996), las fuentes de contaminación no fijas, no presentan una sola descarga de agua sino una serie de descargas sobre determinada área. Un ejemplo de esto son: los escurrimientos de agua que pasan sobre zonas agropecuarias, incluyendo la erosión superficial y sub-superficial con la transferencia de partículas orgánicas e inorgánicas, nutrientes, pesticidas y herbicidas que llegan a los

cuerpos de agua; los escurrimientos de las zonas urbanas que no son dirigidos a un sistema de drenaje, arrastran aceites y sus derivados, bacterias, metales pesados, contaminantes industriales inorgánicos, así como los agroquímicos provenientes de las zonas verdes; los sitios de residuos municipales e industriales, así como los lixiviados provenientes de los basureros, entre otros factores.

Las fuentes de contaminación fijas están relacionadas a una sola descarga de agua. Las aguas residuales sin tratamiento por ejemplo, son las mayores fuentes de contaminación en todo el mundo, otras fuentes son las aguas residuales industriales o provenientes de la minería. Sin embargo, la diferencia entre ambas fuentes de contaminación es que las fuentes fijas pueden ser muestreadas, controladas o tratadas; mientras que las fuentes de contaminación no fijas solamente pueden ser alcanzadas si todas las fuentes de contaminación fijas que pertenecen a estas pueden ser localizadas (Meybeck y Helmer, 1996).

Algunos estudios son orientados hacia entender el efecto de los diferentes usos del suelo en la calidad del agua, mientras otros evalúan la influencia de los diferentes usos del suelo en algún nivel de la cuenca considerando su arreglo espacial y los índices del patrón del paisaje. Sin embargo algunas dificultades a este enfoque radican en las complejas interacciones entre las métricas del paisaje y la calidad del agua (Griffith 2002).

2.7 Los Sistemas de Información Geográfica en las Ciencias Ambientales

De Smith y otros autores (2007) definen a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como una tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común de análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc. de información geográfica.

Desde el surgimiento de los primeros proyectos con SIG, en los años sesenta, estos han evolucionado considerablemente, alcanzando hoy en día áreas tan diversas como la agricultura, biología, urbanismo, arqueología, marketing, sociología, etc. e

involucrando a altas tecnologías como los sistemas de posicionamiento global (GPS), radares, imágenes de satélite, fotografías aéreas, plataformas computacionales, entre otros (de Smith *et ál.* 2007).

Greenberg y otros autores (2002) comentan que los SIG han revolucionado áreas como la Ecología de Paisaje y la Biología de la Conservación, permitiendo el análisis de escenarios de investigación (modelación de procesos ecológicos, simulaciones de cambios en el paisaje, establecimiento de corredores biológicos, etc.) bajo diferentes escalas de tiempo, espacio y complejidad, democratizando así, a una velocidad nunca antes observada, la información generada para una amplia gama de actores, desde el campesino hasta el investigador. Por lo tanto, tomadores de decisión han ingresado al nuevo milenio con nuevas herramientas y capacidades para generar conocimiento e ingredientes fundamentales para enfrentar los actuales retos mundiales.

2.8 Análisis de Decisión Multicriterio

El Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA) o multiobjetivo, es una herramienta muy poderosa que facilita la toma de decisiones mediante un enfoque general y se ha aplicado a una amplia gama de gestión en recursos naturales (Guitouni y Martel 1997, Joerin *et al.* 2001, Imbach 2005, Mendoza y Martins 2006, Mansir Aminu 2007). El MCDA conlleva un proceso para tomar decisiones complejas con una mezcla de criterios en orden de evaluar diferentes alternativas e implica tres pasos generales (Malczewski 1999, Joerin *et al.* 2001):

- 1) Identificación del problema y su estructuración: los interesados, facilitadores y analistas técnicos necesitan desarrollar un entendimiento en común del problema, las decisiones que se tomaran y los criterios que se necesitan para evaluar la decisión.
- 2) Construcción del modelo y su uso: Esto incluye modelar las preferencias de los tomadores de decisiones, valorar las compensaciones, metas, etc. En orden de comparar las alternativas factibles de una manera sistemática y transparente.

- 3) Desarrollo de planes de acción: esto significa tomar acciones basadas en el análisis.

Malczewski (1999) subdivide el paso de construcción de modelos en los siguientes aspectos:

- Una serie de criterios de evaluación (objetivos y/o atributos) para las acciones alternativas.
- Una serie de alternativas o variables de acción.
- Las decisiones ambientales que son variables incontrolables.
- Una serie de resultados para cada alternativa y atributos asociados.

La idea es evaluar un número de alternativas por una serie de criterios de evaluación utilizando preferencias claramente establecidas en un ambiente con variables fijas.

2.8.1 Construcción del Análisis de Decisión Multicriterio Espacial

El análisis de decisión multicriterio espacial envuelve una combinación de datos geográficos (input) en una decisión (output). Los procesos para la toma de decisiones definen una relación o regla de decisión entre el input y el output e implica el uso de datos geográficos, las preferencias de los tomadores de decisión, manipulación de los datos y preferencias acorde a ciertas reglas de decisiones. Al final se encuentra un dato geográfico multidimensional agregado dentro de valores unidimensionales para diferentes decisiones (Guitouni y Martel 1997, Malczewski 1999).

El aspecto crítico del análisis de decisión multicriterio espacial es que implica la evaluación de eventos geográficos basados en los valores de los criterios y en las preferencias de los tomadores de decisiones con respecto a una serie de criterios de evaluación y algunas veces la complejidad del problema en términos de la cantidad de información, los datos y sus interrelaciones pueden exceder la capacidad cognitiva de los tomadores de decisiones (Guitouni y Martel 1997). Sin embargo el rol de las técnicas de SIG y Análisis de Decisión Multicriterio es mejorar la eficiencia de los

tomadores de decisiones resolviendo problemas de decisión espacial (Malczewski 1999).

La decisión multicriterio espacial de problemas puede ser subdividida en dos categorías: decisiones espaciales multi-atributo y decisiones espaciales multi-objetivos. Un problema de toma de decisión multi-atributo puede ser definida por la siguiente regla de decisión (Malczewski 1999):

$$[A_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \succ A_j(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}) \quad x_i, x_j \in X_m; i, j = 1, 2, \dots, m]$$

La cual puede ser interpretada de la siguiente manera: “Aplicar la regla de decisión para elegir la mejor alternativa (para ordenar la alternativa x_i^*) en una serie de alternativas factibles X acorde a los valores de n atributos.

Por otro lado un problema de toma de decisión multi-objetivo puede ser definido por la siguiente regla de decisión (Malczewski 1999):

$$[A_i(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}) \succ A_j(f_{j1}, f_{j2}, \dots, f_{jn}) \quad f_i, f_j \in X_m; i, j = 1, 2, \dots, m]$$

La cual puede ser interpretada de la siguiente manera: “Aplicar la regla de decisión para elegir la mejor alternativa (en orden de alternativas x_i^*) en una serie de alternativas factibles X acorde a los valores de las funciones de objetivos (Fig.1).

2.8.2 Pasos para el Análisis de Decisión Multicriterio espacial

Acorde a Malczewski (1999), el análisis de decisión multicriterio espacial consiste de cuatro pasos principales:

1.- Definición del problema: Esta etapa incluye reconocer el espacio entre la realidad y los diferentes estados deseados. En este punto el ambiente de decisión es definido y los datos son procesados y obtenidos en orden de encontrar pistas para identificar las oportunidades o problemas.

2.- Definir una serie de objetivos concernientes a la decisión del problema y las medidas para conseguir esos objetivos: Estas medidas son llamadas atributos, para cada atributo se debe definir una escala de medida, la cual define cómo se desempeña el atributo con la finalidad de conseguir el objetivo y de esta manera las bases para comparar alternativas.

Los criterios de evaluación pueden ser representados por mapas de evaluación o atributos (también conocidos como mapas temáticos o capas de datos) o por mapas contrastantes. El primero es un atributo geográfico que permite la evaluación de las alternativas desarrolladas por el atributo, mientras que el segundo genera limitaciones en los atributos o las decisiones alternativas (eje. ciertos valores de atributos que definen límites en las alternativas).

La definición de alternativas está ligada a una estructura de valor para una serie de criterios de evaluación (también llamados atributos). Los atributos deben ser determinantes (valores con un efecto predecible en los resultados), probabilísticos (información limitada sobre los valores de los atributos) o lingüísticos (imprecisión o poco claros, concernientes a la descripción del significado de los valores semánticos).

3.- Definir los pesos para los criterios de evaluación: Los pesos definen las preferencias de los tomadores de decisiones expresando la importancia relativa de los atributos para medir una alternativa.

4.- Diseño de una apropiada regla de decisión o función de agregación: La regla de decisión dicta como categorizar alternativas o decidir cual alternativa es preferida sobre otra. El método de adición de peso es utilizado para agregar criterios en los diferentes niveles jerárquicos.

Después de definir la categorización de alternativas, un análisis de sensibilidad debe ser desarrollado para evaluar la robustez del análisis. Un análisis es considerado robusto si los cambios en las entradas o “inputs” (que serían los atributos y preferencias de los tomadores de decisiones) no afectan los resultados o “outputs” (categorización de alternativas). El proceso general termina por hacer recomendaciones para mantener mayores acciones.

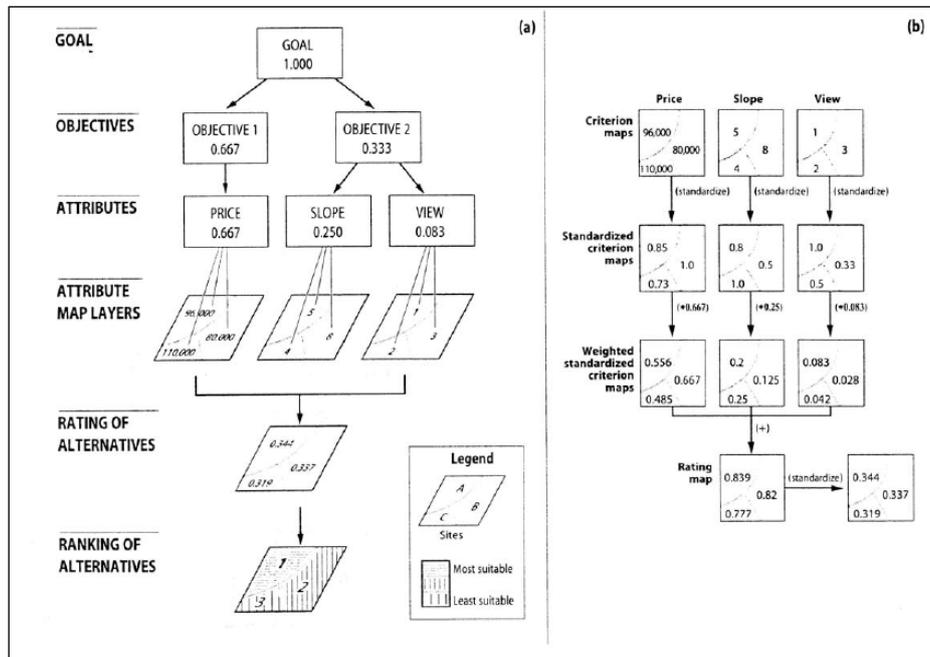


Figura 1. Método de proceso analítico de jerarquías: a) procedimiento; b) SIG-basado en el número de alternativas (Basado en Malczewski, 1999).

2.9 Zona de estudio

2.9.1 La Sierra Madre Oriental

La Sierra Madre Oriental (SMO) es un sistema montañoso que corre con una orientación noreste- sureste desde la frontera con Estados Unidos hasta el centro de la República Mexicana. Considerando las provincias bióticas comprende un área de 60, 978.34 km², que representan el 3% del territorio nacional, en un intervalo altitudinal entre los 200 y 3600 msnm. Además en esta región fisiográfica están representados el 99% de los climas de México ya que debido a su complejo relieve se presentan desde ambientes muy áridos hasta cálidos húmedos (Luna *et al.* 2004).

Como consecuencia de su diversidad climática, la vegetación es también altamente diversa, incluyendo varios tipos de matorrales xerófilos, bosques de coníferas y encinos, bosques mesófilos de montaña y selvas tropicales. En la SMO se concentran más de 2,500 de las 26,000 especies de plantas vasculares estimadas para el país (Luna *et al.* 2004).

La herpetofauna de la SMO está compuesta por 207 especies de las cuales 44 son endémicas, contiene entre el 14 y 27% del total de especies de anfibios y reptiles presentes en México y un alto nivel de endemismos (Canseco-Márquez en Luna *et al.* 2004). En cuanto a la avifauna de esta región, se han registrado 532 especies que corresponde al 41.5% de la avifauna total en México (Navarro en Luna *et al.* 2004). Y se han registrado un total 200 especies de mamíferos de las cuales 5 son endémicas (León-Paniagua en Luna *et al.* 2004).

2.9.2 Generalidades de la Sierra Madre Oriental en San Luis Potosí

Dentro del estado de San Luis Potosí (SLP), la SMO está compuesta por un conjunto montañoso que se extiende en dirección noroeste – sureste a través de la parte central del estado, desde las coordenadas 21° 10' y -22° 40' N hasta 99°09' y 99° 56' W (Fig. 2), donde se incluyen fracciones pertenecientes a las subregiones fisiográficas de las Sierras y Llanuras Occidentales, el Carso Huasteco, la Gran Sierra Plegada y las Sierras Transversales (INEGI 2003, Reyes *et al.* 2009).

Esta gran Región Fisiográfica comprende políticamente 16 municipios entre los cuales se encuentran Rio Verde, Lagunillas, Huehuetlán, Alaquines, Aquismón, Cárdenas, Ciudad del Maíz, Ciudad Valles, El Naranjo, Rayón, Santa Catarina, San Ciro de Acosta, Tamasopo, Tamazunchale, Xilitla, Axtla de Terrazas y Matlapa. En general comprende un área total de 7,705 km² (770,500 ha) (Reyes *et al.* 2009).

De acuerdo con su origen, el material geológico que constituye a este gran complejo fisiográfico es principalmente de tipo sedimentario, formado por calizas del Cretácico inferior y en menor escala por lutitas y areniscas del cretácico superior y del terciario. Se presenta también una variedad de suelos que incluyen litosoles, rendzinas, regosoles, vertisoles, luvisoles y feozems. Las geformas principales incluyen sierras calizas plegadas, alternadas con valles intermontanos y cañadas o sierras bajas en la región de la Sierra Plegada y geformas cársticas en la región del Carso Huasteco y algunos valles intermontanos (INEGI 2003).

La SMO es una provincia biogeográfica que conforma, junto con otros sistemas montañosos, la zona de transición entre las regiones biogeográficas Neártica y Neotropical, por lo que confluyen especies de ambos orígenes, dando lugar a niveles altos de diversidad, riqueza y endemismo. Se reconoce por su alta diversidad alfa y beta y en ella se distribuyen un número elevado de organismos endémicos de distintos taxa (Escalante *et al.* 2005).

En esta región se han registrado 383 especies de aves de las cuales el 16% se encuentran amenazadas o en peligro de extinción acorde a la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES) (Sahagún 2009). Con respecto a la herpetofauna, se tiene un registro de 84 especies presentes en la porción de la SMO perteneciente al Estado de San Luis Potosí (Canseco-Márquez en Luna *et al.* 2004).

En cuanto a la mastofauna, se han registrado 106 especies (León-Paniagua en Luna *et al.* 2004) y mantiene una población residente de jaguar. Se cree que probablemente la SMO en San Luis Potosí represente el área núcleo de jaguares dispersantes hacia el norte a los estados de Tamaulipas y Nuevo León y al sur a los estados de Querétaro y posiblemente Veracruz e Hidalgo, por lo que su conservación es clave para mantener la continuidad de la población de jaguares en el noreste de México (Villordo-Galván 2009).

El estado de San Luis Potosí abarcaba en la época prehispánica dos grandes regiones culturales conocidas como Aridoamérica y Mesoamérica, las cuales tenían su zona de confluencia en la región fisiográfica de la SMO (SEDUCOP 2001), por lo que más del 30% de la población en esta región es de origen indígena (Reyes *et al.* 2009) y depende fuertemente de los recursos forestales como plantas medicinales, comestibles, madera para carpintería y leña, etc. La población indígena está representada por los siguientes grupos étnicos: Los Xí'ói o también llamados "Pames" (Ordóñez 2004); otro grupo son los Nahuas (Valle 2003); y por último se encuentran los Huastecos, también llamados Teenek (Gallardo 2004).

Es importante señalar que la SMO forma parte de la Región Terrestre Prioritaria para la conservación "Sierra Gorda-Río Moctezuma" (Conabio 2000), y dentro de esta

región fisiográfica se localizan una serie de zonas prioritarias consideradas por el Gobierno del Estado de San Luis Potosí para su manejo y conservación, estas son el “Bosque Mesófilo Meridional”, “Bosque de *Quercus Oleoides*”, “Selva Mediana” y “Selva Alta”, el “Río Santa María”, “La Ciénega de Tamasopo” y la “Cuenca del Río Tancuilín” (Gobierno del Estado 2009).

Los pocos estudios que se han realizado para la Zona Media y Zona Huasteca, resaltan la importancia que tiene la SMO por presentar aún grandes extensiones de superficie boscosa y jugar un papel muy importante como corredor de vida silvestre entre las Reservas de la Biósfera El Cielo (al Norte, en el estado de Tamaulipas) y Sierra Gorda (al sur, en el Estado de Querétaro) (Reyes 2010⁴).

2.9.3 Problemática ambiental de la Sierra Madre Oriental en San Luis Potosí

De acuerdo con Flores y colaboradores (2008) el estado de San Luis Potosí cuenta con una superficie forestal total de 4,702,497 ha, siendo la problemática principal de sus bosques la siguiente:

- Dentro del estado se tiene que 3,7 millones de hectáreas presentan condiciones apropiadas para ser zonas de producción pero 962 mil hectáreas son terrenos con aptitud forestal dedicados a otros usos o en proceso de degradación.
- En los bosques del estado existe extracción ilícita de madera sin un adecuado manejo silvícola, esta actividad junto con los cambios de uso de suelo para actividades de agricultura y ganadería son los principales factores del deterioro de los recursos forestales.
- No existe una cultura de turismo en donde se identifique la población con el atractivo natural de los ecosistemas, paisajes y diversidad biológica y que estén conscientes de los beneficios que el turismo pueda proveer.

⁴ Reyes-Hernández H. 2010. Importancia de la SMO en el estado de S.L.P (información personal). Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

En un estudio a escala regional realizado por Reyes y colaboradores (2009), se describe la problemática que engloba a este gran complejo fisiográfico, siendo la siguiente:

- La cobertura de bosque original en esta región ha sido transformada y deforestada junto con el establecimiento de áreas agropecuarias, la creación de proyectos de infraestructura social, incendios forestales y la extracción de especies silvestres.
- La transformación más notable a zonas agrícolas se ha presentado en las zonas con mayor densidad poblacional y donde se concentra la población indígena. Esto se debe a la búsqueda de tierras para cultivo donde aún se practica la técnica de rosa, tumba y quema. Así mismo, se encontró que los principales factores que explican la transformación de la cobertura vegetal en esta región, están relacionados principalmente con la distancia a ciudades, la densidad de caminos y carreteras, la pendiente y el nivel socioeconómico.

2.9.4 El PSA en la zona de estudio

En el estado de San Luis Potosí es relativamente nuevo el concepto de PSA y por esto no se encuentra difundido de manera adecuada entre la población (Flores *et al.* 2008).

Al igual que en el resto del país, en SLP se le da prioridad al PSA por la modalidad de servicios hidrológicos y aproximadamente más del 85% de las solicitudes para el Pago por servicios Ambientales anualmente son rechazadas (Orta-Salazar 2010²) debido a que la elección definitiva se hace a nivel central, basándose en la información generada a nivel nacional y al presupuesto disponible para PSA que cambia cada año.

Aunado a esta situación, al igual que en la mayoría de los estados del país, la zonificación de áreas para el PSA a nivel estatal no presenta criterios suficientes para su zonificación debido a la falta de información y recursos para realizar estudios de esta índole.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Enfoque general

En el presente trabajo de investigación se identificaron a nivel regional aquellas zonas donde los beneficios relacionados con la provisión de servicios ecosistémicos reconocidos por el esquema de PSA en México (hidrológicos y derivados de la conservación de la biodiversidad) son relevantes por su oferta y demanda, así como por el riesgo de perder dichos servicios.

De esta manera, la identificación de áreas prioritarias para el pago por servicios ambientales se basa en gran parte en la metodología empleada por Imbach (2005) donde mediante la combinación de SIG y el análisis para la toma de decisiones Multicriterio propuesta por Malczewski (1999) se identificaron las áreas prioritarias para el pago por servicios ambientales en Costa Rica.

La metodología empleada por Imbach (2005) consiste de dos componentes principales cuya integración permite dar prioridades para el PSA; esto se refiere a que un mapa de provisión de servicios ecosistémicos es combinado con un mapa de la amenaza o riesgo a perder estos servicios. En esta metodología se le da prioridades a las diferentes actividades elegibles bajo los actuales esquemas de servicios ambientales de CONAFOR (que serían la conservación del bosque y los SAF) pero cada una es evaluada de forma diferente.

Para eventualmente comparar prioridades entre los servicios ecosistémicos, se le debe asignar un peso a cada uno, basado en el conocimiento sobre como las prioridades serán calculadas para cada uno. La cuantificación hecha para cada SE así como el riesgo de perderlos, envuelve la combinación de diferentes criterios medibles con diferentes unidades que no solo tienen un rango de valores diferente sino también diferente significado en los términos del servicio evaluado.

Debido a la naturaleza heterogénea de los datos, estos toman valores y escalas muy diferentes y por ello se deben estandarizar. Este detalle se resuelve a través de la

estandarización del criterio en la cual todos los criterios son transformados en una escala común de medida y también el significado de los valores es evaluado en términos del objetivo (diferentes técnicas de estandarización son presentadas por Malczewski 1999).

Como se muestra en la Figura 3, antes de integrar los criterios e indicadores para generar los mapas de oferta de servicios, demanda o riesgo, la importancia relativa de cada criterio y de cada indicador, es evaluada a través de la asignación de pesos mediante la consulta de literatura y por medio de la consulta con expertos. Una vez obtenidos los pesos de los criterios, se hace un análisis de consistencia de las proporciones con la finalidad de identificar incongruencias en la matriz de pesos asignados por los expertos.

Para comprobar si algún criterio o indicador propuesto para determinado objetivo está siendo redundante se realiza un análisis de correlación (r). Posteriormente se hace un análisis de sensibilidad para valorar la robustez del proceso al determinar cómo afectan cambios pequeños en las entradas, a la línea de acción recomendada (la salida o el “output”).

En la elaboración de los mapas de indicadores y criterios que permiten identificar espacialmente las áreas prioritarias para el PSA, se emplearon principalmente las diferentes herramientas y extensiones que ofrece el software ArcGis 9.0. La unidad mínima de mapeo (píxel) en todos los casos es de 25 x 25 m.

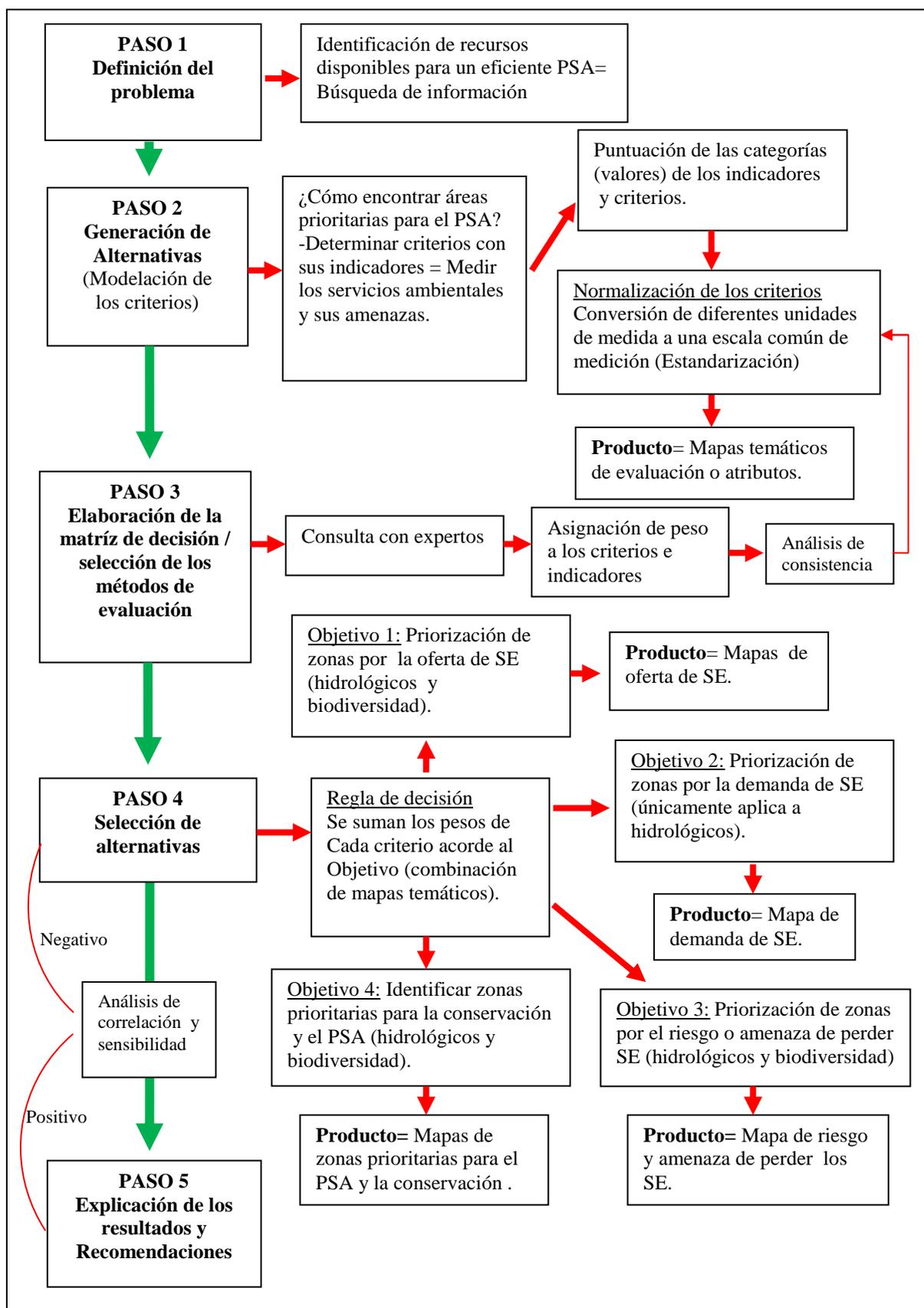


Figura 3. Pasos para la priorización espacial de áreas para el PSA hidrológicos y derivados de la conservación de la Biodiversidad, en la región fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México (Basado en, Sendra s.f., Malcsewski 1999 e Imbach 2005).

3.2 Asignación de valores y pesos a criterios e indicadores

Este estudio requiere la integración de conceptos de manejo ambiental en forma de mapas de criterios integrados en una estructura jerárquica para evaluar el desempeño de ciertas actividades (Figura 4). Los criterios que se utilizan para evaluar las zonas con prioridad por su importancia para la provisión de los servicios ambientales, su demanda y el riesgo o amenaza de perderlos, fueron elegidos acorde a la literatura consultada y la información disponible para la zona de estudio.

Es importante señalar que en el caso de la demanda para los servicios derivados de la biodiversidad, en el presente estudio no se considera una demanda como tal por parte de los usuarios debido a que los servicios derivados de la biodiversidad son importantes únicamente por el valor de existencia de la misma, que en este caso se remite únicamente a la conservación de los ecosistemas que la proveen y ciertos usos de la tierra que no alteran significativamente la función de los mismos como son la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF).

Los valores y pesos para los criterios e indicadores que nos permitirán identificar espacialmente las áreas prioritarias para el pago por servicios ambientales fueron obtenidos mediante la consulta de literatura y a través de la consulta con un total de 28 expertos de diversas instancias gubernamentales, académicas y ONG's concernientes a la zona de estudio.

El peso asignado por los expertos (W) a los criterios, se obtuvo utilizando el método de comparación "Pair wise comparison" (o comparación por pares) desarrollada por Saaty (1977); mientras que el peso de los indicadores se obtuvo mediante el "Ratio estimation procedure" (Procedimiento de estimación de porcentajes). En ambos métodos se utilizó un rango de escala del 0 al 100 (los métodos son completamente explicados en Malczewski 1999).

De esta forma, el método "Pair wise comparison" se utiliza para el nivel jerárquico de más arriba porque es más preciso cuando se necesita comparar cada criterio con el restante e implica el cálculo de una proporción de consistencia de los resultados para evaluar la coherencia de comparaciones. En cambio, el "Ratio

estimation procedure” es más fácil (simple y rápido) de utilizar por lo que se aplicó únicamente en el nivel jerárquico menor que corresponde a los indicadores de cada criterio (Figura 4).

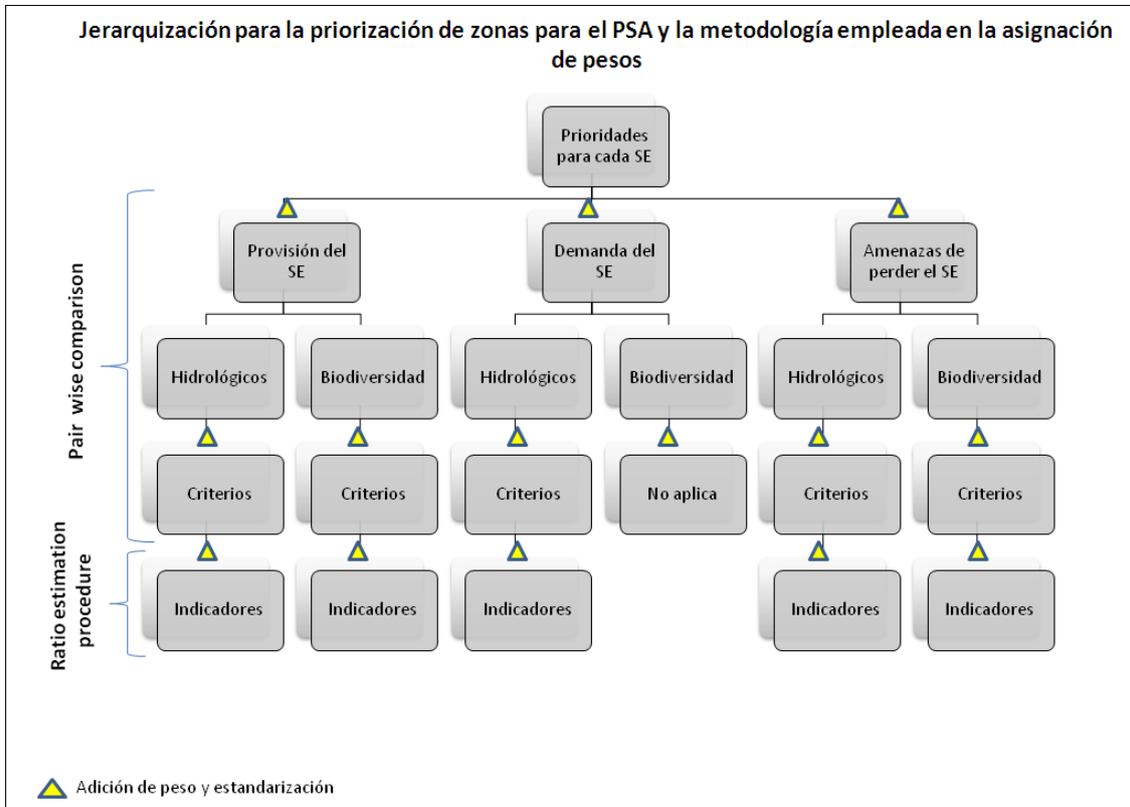


Figura 4. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA y los métodos para la asignación de pesos.

En este estudio se utiliza el “procedimiento de rangos record”. Para los criterios e indicadores benéficos la **Ecuación 1a** es utilizada y para los criterios e indicadores de costos se utiliza la **Ecuación 1b**. La interpretación de estas ecuaciones es que cuando el criterio o indicador benéfico es el más alto, el valor es más atractivo y el criterio tiene que ser maximizado; y cuando el criterio o indicador de costos es mayor, el valor es menos atractivo y el criterio tiene que minimizarse.

Ecuación 1a $X'_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin} / X_{jmax} - X_{jmin}) * 100$

Ecuación 1b $X'_{ij} = (X_{jmax} - X_{ij} / X_{jmax} - X_{jmin}) * 100$

Donde:

X'_{ij} = Valor del pixel estandarizado

X_{ij} = Valor de todos los pixeles en el mapa

X_{jmax} = Valor máximo del pixel en el mapa

X_{jmin} = Valor mínimo del pixel en el mapa

En el caso de variables cualitativas y categóricas se utiliza la **Ecuación 1c**, mediante la cual se le asigna un valor con rango equivalente (de forma ascendente o descendente) a cada clase o categoría.

$$\text{Ecuación 1c} \quad X_{jmax}/n$$

Donde:

X_{jmax} = Valor máximo del pixel en el mapa

n = Número de clases o categorías

A continuación se presenta la jerarquización, los pesos y la explicación de los criterios e indicadores que se evaluaron para la priorización de áreas para el PSA hidrológicos y derivados de la conservación de la biodiversidad en la región fisiográfica de la SMO.

3.3 Priorización de áreas por la provisión de SE derivados de la conservación de la Biodiversidad

Conservación de la biodiversidad implica desde la preservación de especies particulares a un enfoque más amplio como preservar las funciones y servicios de los ecosistemas, tratando de mantener todas las especies y genes (Ferrier 2002, Sierra *et al.* 2002, Noss 1990).

El pago por servicios ambientales que otorga la CONAFOR para conservación de la biodiversidad se destina por concepto de “Conservar la flora y fauna silvestre en sistemas forestales y sistemas agroforestales con cultivos bajo sombra” (Diario Oficial de la Federación 2009). Entendiéndose el concepto de vegetación forestal, como “el conjunto de plantas y hongos que crecen y se desarrollan en forma natural, formando bosques, selvas, zonas áridas y semiáridas, y otros ecosistemas, dando lugar al

desarrollo y convivencia equilibrada de otros recursos y procesos naturales” (Diario Oficial de la Federación 2003a).

Basados en los usos del suelo considerados por CONAFOR para el PSA por concepto de Biodiversidad, en el presente estudio, se generó un mapa con zonas prioritarias para la implementación de Sistemas Agroforestales y un mapa con las zonas prioritarias para la conservación de la biodiversidad *in situ*. Asumiendo que las zonas con mayor valor para la conservación y para la implementación de SAF (como una medida de restauración), son las únicas donde la biodiversidad provee la mayor cantidad de servicios ecosistémicos (Figuras 5, 6 y 7).

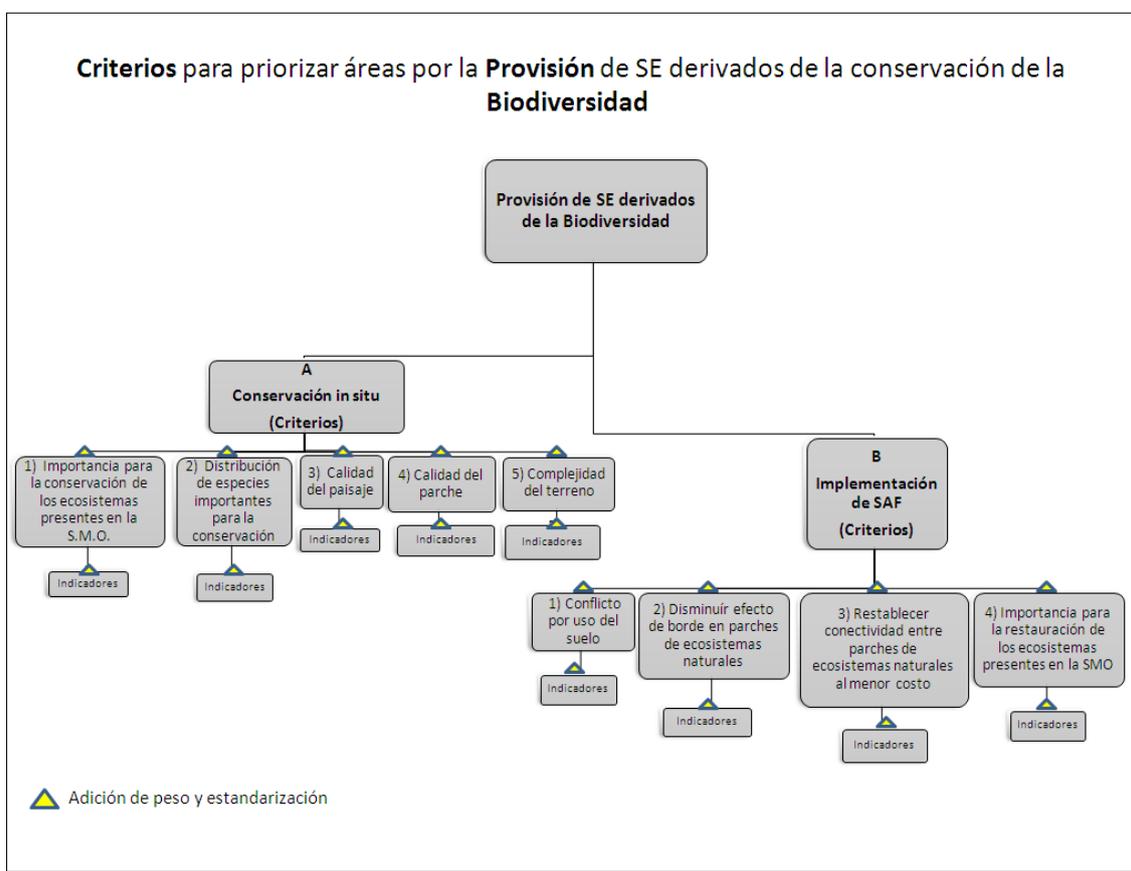


Figura 5. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA derivados de la conservación de la Biodiversidad.

3.3.1 Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por conservación de la biodiversidad

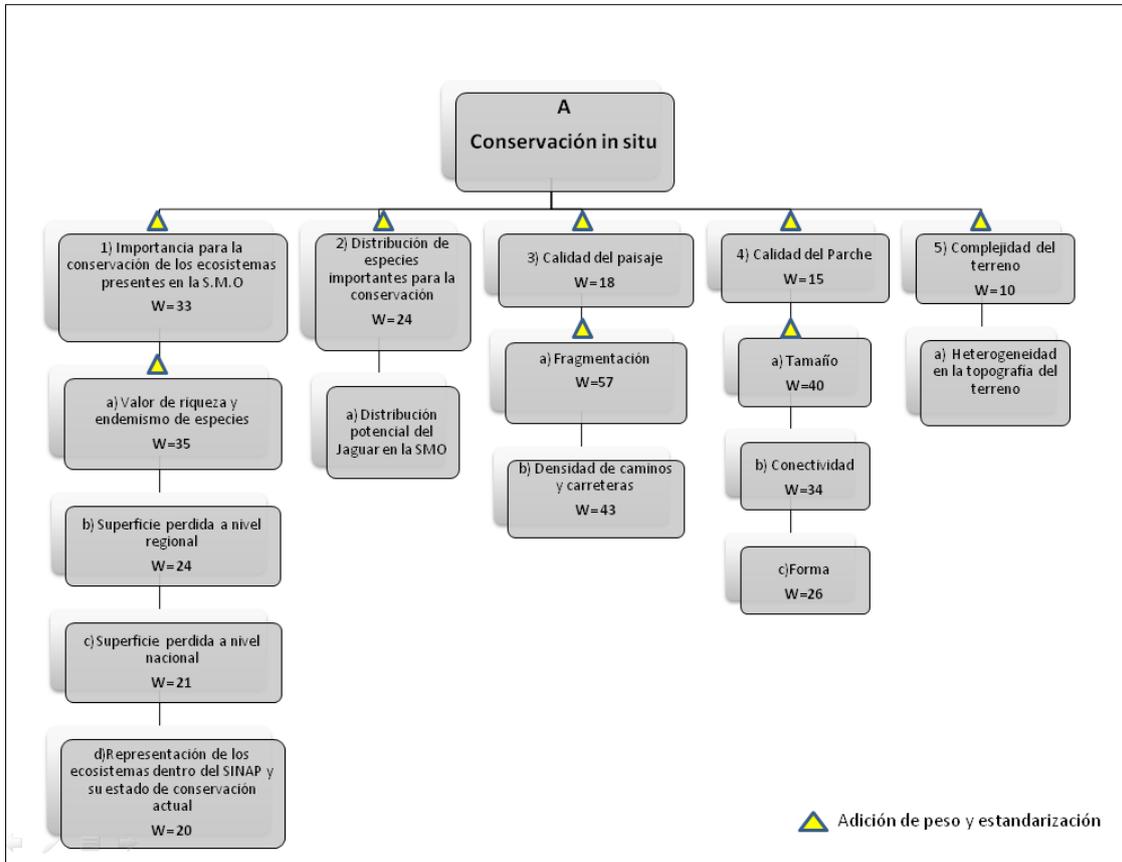


Figura 6. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por conservación de la Biodiversidad in situ con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.

Criterio 1: Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO

Acorde los mapas de vegetación y uso de suelo (UASLP 2006a), en esta región se encuentran representados 19 tipos de vegetación (Anexo 1), según el sistema de clasificación de la vegetación de México (Rzedowski 2006). En el presente estudio se considera ecosistemas a los tipos de vegetación y para asignarles un valor por su importancia para la conservación se consideran 4 indicadores los cuales se explican a continuación.

- a) **Valor de los ecosistemas por su riqueza y endemismo de especies:** Los datos proporcionados por Flores y Gerez (1994) nos dan una idea del número de

especies y endemismos que componen a los ecosistemas presentes en el país. Si se asume que los ecosistemas con un mayor número de especies y endemismos son los más importantes para la conservación de la biodiversidad; mediante el uso de la **Ecuación 1a**, se asigna a cada ecosistema un valor por la riqueza de especies y un valor por el endemismo de especies, siendo 100 el valor más alto. Después se promedian ambos valores para cada ecosistema y se obtiene su valor final aplicando nuevamente la **Ecuación 1a** (Cuadro 1, Anexo 2).

Cuadro 1. Valor asignado a los ecosistemas por su riqueza y endemismo de especies.

Tipos de vegetación (ecosistemas)	Valor por su no. especies	Valor por su no. endemismos	Valor final (no. especies/no. endemismos)
Bosque Mesófilo de Montaña	90	100	100
Matorral xerofilo	75	95	84
Bosque de encino	100	50	79
Bosque de Pino-encino	94	47	75
Bosque de pino	88	47	72
Bosque tropical caducifolio	76	26	54
Bosque tropical perenifolio	65	24	47
Bosque tropical subcaducifolio	58	18	40
Bosque secundario	61	8	36
Bosque espinoso	44	11	28
Pastizales inducidos y cultivos	34	5	20
Veg. Acuatica y subacuatica	17	10	14
Pastizal zacatonal	8	0	5
Resto de ecosistemas	¿?	¿?	1

- a) **Superficie perdida a nivel regional:** Reyes *et al.* (2009) establece cuales son los ecosistemas con una mayor pérdida de superficie en la SMO desde el año 1989 al año 2005. Si se asume que los ecosistemas con una mayor pérdida de superficie en la región representan una mayor prioridad para su conservación; mediante la utilización de la **Ecuación 1a**, a los ecosistemas con mayor porcentaje de superficie perdida se les asigna el mayor valor (100) y este valor desciende a los que han perdido menos superficie (Cuadro 2, Anexo 3).

Cuadro 2. Valor asignado a los ecosistemas por su superficie perdida a nivel regional.

Ecosistemas	Superficie en 1989 (km²)	Superficie en 2005 (km²)	Superficie perdida (%)	Valor
Bosques tropicales	244.1	223.2	8.56	100
Matorrales xerófilos	193.8	187.5	4.1	48
Bosques templados	119.5	114.6	3.25	38
Resto de ecosistemas u otros usos del suelo	?	?	0	1

b) **Superficie perdida a nivel nacional:** Sarukhán *et al.* (2009) establece cuales son los ecosistemas con mayor pérdida de superficie en el país. De esta manera al igual que en el indicador anterior, mediante el uso de la **Ecuación 1a**, se les da un mayor valor (100) para la conservación a los ecosistemas que han perdido un mayor porcentaje de cobertura y a los ecosistemas con menor pérdida de cobertura se les asigna el menor valor (Cuadro 3, Anexo 4).

Cuadro 3. Valor asignado a los ecosistemas por su superficie perdida a nivel nacional.

Ecosistemas (Tipos de vegetación)	Pérdida de sup. (%)	Valor
B. tropical húmedo	78	100
B. tropical seco	73	94
B. Mesófilo de Montaña	66	85
B. templado	52	67
Zonas áridas y semiáridas	16	20
Resto de ecosistemas	?	1

c) **Representación de los ecosistemas dentro del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SINAP) y su estado de conservación actual:** Si se asume que los ecosistemas con menor superficie bajo protección son los más vulnerables a desaparecer cuando su superficie actual es poco representativa dentro del territorio nacional; con base en los datos proporcionados por Bezaury y Gutiérrez *et al.* (2009), en el presente estudio, a los ecosistemas cuya superficie es la menos representativa dentro de alguna categoría del SINAP se les asigna el máximo valor (100) por su prioridad para ser protegidos y mediante el uso de la **Ecuación 1b**, se le asigna el valor al resto de los ecosistemas.

Se hace el mismo procedimiento para otorgarles un valor por su representatividad de superficie actual en el país y asumiendo que los ecosistemas con menor superficie en el país tienen mayor prioridad de protección, se les asigna el mayor valor (100) y mediante el uso de la **Ecuación 1b**, se da valor al resto de ecosistemas.

Se promedian ambos valores “representación dentro del SINAP” y “superficie actual en el país”, posteriormente mediante el uso de la **Ecuación 1a**, se obtiene el valor de los ecosistemas por su representación dentro del SINAP y por su estado de conservación actual (Cuadro 4, Anexo 5).

Cuadro 4. Valor asignado a los ecosistemas por su representación dentro del SINAP y su estado de conservación actual.

Ecosistemas	Valor por x su superficie actual en el país	Valor por su representación dentro del SINAP	Valor final (estado de conservación actual/ representación dentro del SINAP)
Pastizal	100	29	100
Mezquital, palmar y veg. de dunas costeras	13	100	88
Selva subcaducifolia	57	44	79
Bosque de coníferas	75	16	71
Bosque de encino	47	11	45
Selva caducifolia	47	10	45
Bosque Mesófilo de Montaña	17	33	38
Bosque espinoso	17	24	32
Matorral Xerófilo	21	2	18
Selva perenifolia y subperenifolia	10	4	11
Resto de ecosistemas	4	1	3

Finalmente estos 4 indicadores son combinados a través de una suma de pesos simple utilizando la **Ecuación 2**, mediante la cual se genera el mapa del criterio “Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO” (Anexo 6).

$$\text{ICE} = [(\text{VEREE} * 0.35) + (\text{PSR} * 0.24) + (\text{PSN} * 0.21) + (\text{RESINAP} * 0.20)]$$

Ecuación 2

Donde:

ICE = Mapa de Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO

VEREE= Mapa de Valor de los ecosistemas por su riqueza y endemismo de especies

PSR = Mapa de Pérdida de superficie a nivel regional

PSN = Mapa de Pérdida de superficie a nivel nacional

RESINAP = Mapa de Representación de los ecosistemas dentro del SINAP y su estado de conservación actual

Los pesos (W) utilizados en la **Ecuación 2** fueron obtenidos a través de la consulta con expertos.

Criterio 2: Distribución de especies importantes para la conservación

El Jaguar (*Panthera onca*) es una de las principales especies incluidas dentro del Convenio sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre y es considerada como una especie casi amenazada (UICN 2009). En el ámbito nacional está considerada por la NOM-059 como una especie en peligro de extinción principalmente por la cacería indiscriminada y la pérdida de su hábitat por la deforestación (Diario Oficial de la Federación 2002).

La SMO es un corredor con gran potencial para la movilidad del jaguar (Villordo-Galván 2009) y se asume que al proteger áreas con los recursos necesarios para asegurar la permanencia de las poblaciones de jaguares, muchas otras especies que tienen áreas de distribución más restringida también se benefician (Miller y Rabinowitz 2002), ya que el jaguar es considerado una especie “sombriilla”.

Con base en el mapa de distribución potencial del jaguar en el estado de San Luis Potosí, generado mediante el modelo MaxEnt originado a partir de 26 registros de jaguar confirmados (Villordo-Galván 2009) (Anexo 7); para otorgarle peso a este criterio se utiliza como indicador las zonas con mayor probabilidad de ser aptas como hábitat para el jaguar. Se hace una estandarización lineal utilizando la **Ecuación 1a** donde el mayor valor (100) corresponde a las áreas con la probabilidad más alta como hábitat para el Jaguar y el menor valor corresponde a las zonas con menor probabilidad (Cuadro 5, Anexo 8).

Cuadro 5. Valor asignado a las áreas con probabilidad de presencia del jaguar.

Probabilidad de presencia del jaguar	Valor
100	100
a	a
0	0

Criterio 3: Calidad del paisaje

En el presente estudio, la calidad del paisaje es evaluada por 2 indicadores, los cuales se explican a continuación:

- a) Fragmentación:** Existen diferentes formas de fragmentar un paisaje, estas se miden en términos del número de parches, su tamaño medio y la distancia media entre ellos (Fahrig 2003, McIntyre y Hobbs 1999), o bien mediante el cálculo del porcentaje de superficie en el paisaje (Turner *et al.* 2001).

Para estimar cuales son las zonas en el paisaje con mayor fragmentación, se utilizó como base los mapas de vegetación y uso de suelo en la SMO (UASLP 2006a) y el mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI 2005), con este último se completó la información del uso de suelo correspondiente al área fuera de la zona de estudio para poder establecer un buffer de 10 km que permitiera realizar de manera precisa el análisis de fragmentación del paisaje.

El análisis de fragmentación se realizó con la implementación de la metodología propuesta por Imbach (2005) donde con ayuda del programa ERDAS, en una ventana de determinada dimensión se escanea todo el paisaje calculando el número de píxeles con cobertura original dentro de la misma. En este caso se utiliza una ventana de 7 x 7 km (49 km²) que es un área equivalente al rango del hábitat promedio del jaguar cuya área mínima varía mucho pero que generalmente oscila entre 32 km² en hembras y 45 km² en machos (Silveira 2004, Peña *et al.* 2006, Astete *et al.* 2008).

Mediante una estandarización lineal utilizando la **Ecuación 1a**, se establece cuáles son las áreas del paisaje más fragmentadas asignando el mayor valor

(100) a las ventanas con mayor porcentaje de cobertura natural y el menor valor a las áreas sin cobertura (Cuadro 6, Anexo 9).

Cuadro 6. Valor asignado a las áreas con diferentes grados de fragmentación en el paisaje.

Porcentaje (%) de cobertura original en una ventana de 49 km ²	Valor
100	100
a	a
0	0

b) Densidad de caminos y carreteras: La presencia de caminos y carreteras es un factor que impide la movilidad de algunas especies, causando el aislamiento entre sus poblaciones (Turner et al 2001, Laurance *et al.* 2002, Bennett 2004).

Con base en las cartas topográficas (INEGI 2002) y las imágenes satelitales LANDSAT (2005) correspondientes a la zona de estudio, junto con el trazo de la nueva carretera Valles-RíoVerde (UASLP 2006b), se digitalizó un mapa de caminos y carreteras.

Para obtener el peso de distancia a caminos y carreteras se realizó un análisis espacial de distancia entre caminos y carreteras, calculando la distancia de los píxeles a caminos y carreteras de todo el paisaje. Mediante una estandarización lineal utilizando la **Ecuación 1a**; el mayor valor (100) se asigna a las zonas donde no existen caminos y carreteras por estar a distancias considerables y el menor valor se asigna a las zonas donde la distancia entre caminos y carreteras es menor (Cuadro 7, Anexo 10).

Cuadro 7. Valor asignado a las áreas por su distancia entre caminos y carreteras.

Distancia a caminos y carreteras (m)	Valor
13623	100
a	a
0	0

Finalmente estos 2 indicadores son combinados a través de una suma de pesos simple utilizando la **Ecuación 3**, mediante la cual se genera el mapa del criterio “Calidad del paisaje” (Anexo 11).

$$\text{Calidad Paisaje} = [(\text{Frag} * 0.57) + (\text{DC} * 0.43)]$$

Ecuación 3

Donde:

Calidad Paisaje = Mapa de Calidad del paisaje

Frag = Mapa de Fragmentación

DC = Mapa de Densidad de caminos y carreteras

Los pesos (W) utilizados en la **Ecuación 3** fueron obtenidos a través de la consulta con expertos.

Criterio 4: Calidad del parche

Con base en el mapa de vegetación y uso de suelo en la SMO (UASLP 2006a) y el mapa de uso de suelo y vegetación (INEGI 2005), el criterio calidad del parche es valorado por 3 indicadores, los cuales se detallan a continuación:

- a) **Tamaño del parche:** Entre mayor sea el tamaño del parche con vegetación natural, alberga un mayor número de especies (Turner *et al.* 2001). En este sentido, Laurance y colaboradores (2002) sugieren que los parches mayores a 100 ha son recomendables como hábitat para muchas especies.

Se asume que los parches mayores a 100 ha son prioritarios para la conservación de la biodiversidad y en base a lo que establece Dinerstein (1995) con respecto al tamaño ideal de parche para mantener poblaciones viables de organismos, a los parches mayores a 10,000 ha se les asigna el máximo valor (100) para la conservación.

Mediante una estandarización lineal utilizando la **Ecuación 1a**, se les otorga un valor a los diferentes tamaños de parches de ecosistemas naturales en la zona de estudio (Cuadro 8, Anexo 12).

Cuadro 8. Valor asignado a los diferentes tamaños de parche.

Área del parche (ha)	Valor
$\geq 10,000$	100
a	a
≤ 100	1

- b) Forma del parche:** El efecto de borde es mayor si el parche es de forma muy irregular, en cambio si el parche tiene una forma más homogénea (cercana a un círculo), el efecto de borde disminuye (Turner *et al.* 2001). El índice de forma (relación Perímetro/Área) es la métrica que nos indica la complejidad de la forma del parche y conforme más se acerca al valor de la unidad (1), su complejidad es menor.

Se asume que conforme menos compleja sea la forma de un parche, su calidad como hábitat para algunas especies es mejor, por lo tanto se le asigna el mayor valor para la conservación (100) y mediante una estandarización lineal utilizando la **Ecuación 1b**, se le asigna un menor valor a los parches cuya forma sea más compleja (Cuadro 9, Anexo 13)

Cuadro 9. Valor asignado a las diferentes formas de parche.

Forma del parche (Perímetro/Área)	Valor
1.31	100
a	a
10.84	1

- c) Conectividad:** Aún existe un dilema entre ecólogos sobre si será mejor para la conectividad, un paisaje con muchos parches pequeños y contiguos o un paisaje con pocos parches grandes aunque estén más aislados (Turner *et al.* 2001, Bennett 2004).

Para fines del presente estudio, se asume que el parche con menor distancia con respecto al resto de parches es el que tiene una mayor conectividad. Se utiliza la métrica de distancia mínima entre parches y mediante una estandarización lineal utilizando la **Ecuación 1b**, se le asigna un mayor valor para la conservación

(100) a aquellos parches cuya distancia promedio entre sí es la menor (Cuadro 10, Anexo 14).

Cuadro 10. Valor asignado a los parches con diferente grado de conectividad.

Distancia mínima entre parches (m)	Valor
22.4	100
a	a
1433	1

Finalmente estos 3 indicadores son combinados a través de una suma de pesos simple utilizando la **Ecuación 4**, mediante la cual se genera el mapa del criterio “Calidad del parche” (Anexo 15).

$$\text{Calidad del parche} = [(TP * 0.40) + (FP * 0.26) + (CP * 0.34)]$$

Ecuación 4

Donde:

Calidad del parche = Mapa de Calidad del parche

TP = Mapa de Tamaño del parche

FP = Mapa de Forma del parche

CP = Mapa de Conectividad del parche

Los pesos (W) utilizados en la **Ecuación 4** fueron obtenidos a través de la consulta con expertos.

Criterio 5: Complejidad del terreno

Los sistemas naturales se configuran en el espacio en respuesta a gradientes de topografía, temperatura, humedad, tipo de suelos, los disturbios, interacciones bióticas y la intervención del hombre en el uso de la tierra (Turner *et al.* 2001).

En este sentido, Honnay y colaboradores (2002) mencionan que los hábitats con condiciones abióticas heterogéneas tienen más nichos con diversos potenciales. Entonces se asume que conforme el terreno es más complejo, este tiene diferente exposición al sol, humedad y variedad de especies vegetales, por lo tanto indica mayor diversidad de hábitats (Turner, *et al.* 2001).

Para obtener la complejidad del terreno en el presente estudio, se utiliza la metodología empleada por Imbach (2005), donde la complejidad del terreno se estima utilizando un Modelo Digital de Elevación (Anexo 16) y es calculada mediante la asignación al píxel central de una ventana (en este caso de 270 x 270 m) con la desviación estándar de todos los píxeles dentro de la ventana. Se obtiene el peso del indicador mediante una estandarización lineal utilizando la **Ecuación 1a**, asignándole el mayor valor (100) a las zonas donde el terreno presente una mayor complejidad, es decir; donde la desviación estándar es mayor (Cuadro 11, Anexo 17).

Cuadro 11. Valor asignado a las áreas con diferente grado de complejidad de terreno.

Heterogeneidad del terreno (desviación estándar de los píxeles sobre el terreno)	Valor
130.17	100
a	a
0	1

3.3.2 Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por la implementación de SAF

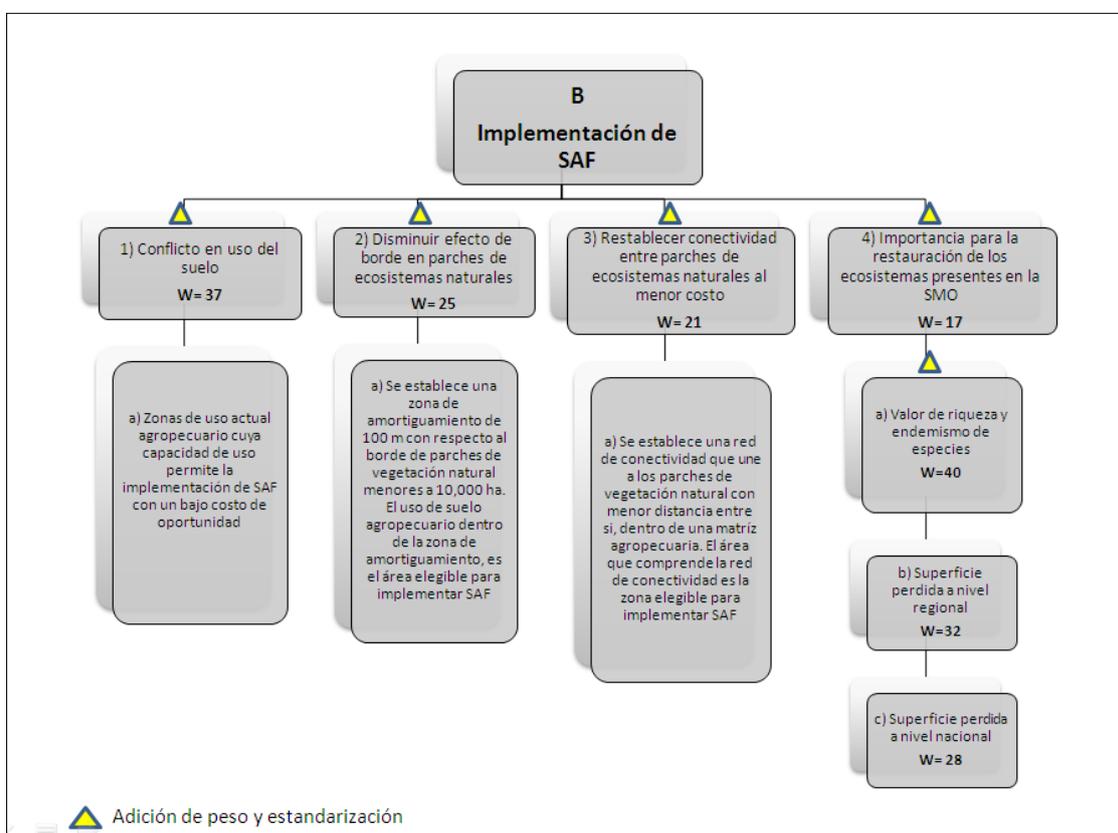


Figura 7. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la implementación de SAF con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.

La implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) en este estudio se asume como una medida de restauración y se hace efectiva únicamente en áreas cuyo uso del suelo es de índole agropecuario. Por lo tanto cualquier uso de suelo que no entre dentro de esta clasificación se excluye.

Los mapas de criterios e indicadores utilizados en la identificación espacial de áreas prioritarias para la implementación de SAF se hicieron con base en los mapas de vegetación y uso de suelo (UASLP 2006a). A continuación se explican cada uno de los criterios e indicadores.

Criterio 1: Conflicto en uso del suelo

Acorde a las recomendaciones establecidas por diversos autores (en OIMT/UICN 2005 y OIMT 2002) la restauración (que en este caso se refiere únicamente a la implementación de SAF) tiene mayor efecto y un menor costo de oportunidad en zonas con conflicto en el uso del suelo, es decir; zonas con limitantes para prácticas agropecuarias convencionales.

Para este criterio, se utiliza la clasificación de la capacidad agrológica de los suelos elaborada por la USDA (Klingebiel y Montgomery 1961) donde el agrupamiento más alto es el de clases, de las cuales hay 8. Todos los suelos en una clase tienen limitaciones y problemas de manejo casi de la misma categoría pero pueden ser de diferente grado (Cuadro 12).

Cuadro 12. Clases de capacidad agrológica de los suelos (USDA 1961)

Clase de Capacidad	Intensidad en el uso
I	Uso potencial para cualquier tipo de actividad, se permite desde un uso pecuario y agrícola muy intenso, hasta un uso forestal o para la conservación de la vida silvestre.
II	Uso potencial desde pecuario y agrícola intenso hasta un uso forestal o para la conservación de la vida silvestre.
III	Uso potencial desde pecuario y agrícola moderado hasta un uso forestal y de vida silvestre.
IV	Uso pecuario y agrícola limitado hasta un uso forestal o para la conservación de la vida silvestre
V	Uso potencial para la vida silvestre, uso forestal y hasta pecuario intenso pero no es apto para fines agrícolas
VI	Uso potencial de vida silvestre, forestal y hasta pecuario moderado
VII	Uso potencial para la conservación de vida silvestre y forestal limitado
VIII	Uso exclusivo para conservación de la vida silvestre

Con base en las cartas de uso potencial (INEGI 1984) y la metodología empleada por la USDA (1961), se elaboró un mapa de uso potencial agrológico para la SMO (Anexo 18). Utilizando este mapa junto con los mapas de vegetación y uso del suelo (UASLP 2006a), se elabora un mapa de conflicto en el uso del suelo, el cual va desde un conflicto muy alto hasta muy bajo o nulo. Tomando como referencia el uso

actual & uso potencial, se elabora un mapa de conflicto por uso del suelo. Se le asigna un mayor valor para la implementación de SAF, a las zonas donde el conflicto por uso del suelo es muy alto (100) y un menor valor a las zonas donde el conflicto en uso del suelo es bajo (Cuadro 13, Anexo 19).

Cuadro 13. Valor asignado a las áreas con mayor potencial para la implementación de SAF por conflicto en uso del suelo.

CONFLICTO (Valor) Alto= 100 Bajo= 1	USO DEL SUELO EN LA SMO		
	Agrícola	Pecuario	Vida silvestre
I	1	1	1
II	1	1	1
III	1	1	1
IV	100	100	1
V	100	100	1
VI	100	100	1
VII	1	1	1
VIII	1	1	1

Criterio 2: Disminuir efecto de borde en parches de ecosistemas naturales

La restauración también permite mitigar los efectos de borde cuando se usa para establecer zonas de amortiguación alrededor de los fragmentos naturales (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial 2003). En este sentido, los SAF ayudan a reducir la frecuencia e intensidad de incendios, disminuyen los efectos de bordes en los fragmentos forestales remanentes y amortiguan áreas protegidas (Schroth *et al.* en Beer *et al.* 2003).

Bajo estos supuestos, en el presente estudio se seleccionan los parches cuya superficie tiene prioridad para la restauración, que en este caso es menor a 10,000 ha (acorde a Dinerstein 1995) y con base en las recomendaciones de Laurance y colaboradores (2002), se establece un buffer de 100 m alrededor de estos parches debido

a que la mayoría de las especies en la Amazonía evitan áreas cerca de los 100 m con respecto al borde del parche de bosque.

Las áreas de uso agropecuario que estén dentro del buffer de 100 m correspondiente a la zona de amortiguamiento de cada parche, es el área delimitada para establecer SAF y se les asigna el máximo valor (100) (Anexo 20).

Criterio 3: Restablecer la conectividad entre parches de ecosistemas naturales al menor costo

Es posible restablecer la conectividad estructural de un ecosistema en el paisaje a través de la restauración. La conectividad estructural consiste en restablecer la conexión física entre dos fragmentos con la finalidad de que puedan desplazarse algunas especies (de fácil movilidad) y se puede lograr a través de un corredor o un conector (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial 2003).

En este sentido, los SAF proveen hábitat y recursos para especies de plantas y animales manteniendo la conectividad en el paisaje facilitando el movimiento de animales, semillas y polen (Schroth *et al.* en Beer *et al.* 2003). Sin embargo, restaurar áreas afectadas ya sea por causas naturales o humanas resulta sumamente costosa; por ejemplo en México se estima que para restaurar se requieren US\$180 mientras que se necesitan menos de US\$5 para conservar esa misma superficie (SEMARNAT-NESTLE 2000).

Bajo estos supuestos, se realizó un análisis de conectividad a nivel de paisaje, donde de forma visual se identificaron los parches con menor distancia entre sí. Una vez identificados, se midió la distancia mínima entre cada parche para trazar las redes de conectividad de 100 m de ancho. El trazo de las redes se realizó considerando los diferentes usos del suelo, evitando que cruzara zonas urbanas, caminos, carreteras y cuerpos de agua, de manera que únicamente quedaran trazadas sobre las zonas de uso de suelo agropecuario.

A las áreas que comprenden las redes de conectividad se les asignó el mayor valor (100) para la implementación de SAF (Anexo 21).

Criterio 4: Importancia para la restauración de los ecosistemas presentes en la SMO

En el presente estudio, este criterio hace referencia únicamente a la restauración de los parches de ecosistemas naturales presentes en la SMO mediante la disminución de su efecto de borde. El método consiste en seleccionar los parches de ecosistemas naturales menores a 10,000 ha, establecer un buffer de 100 m alrededor de los mismos y asignarles su valor para la restauración mediante el uso de 3 indicadores que se explican a continuación (Figura 7).

- a) **Valor de los ecosistemas por su riqueza y endemismo de especies:** Al igual que como se muestra en el criterio “Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO”, mediante el uso de la **Ecuación 1a**, a los parches de los ecosistemas con mayor riqueza de especies y endemismo se les asigna el mayor valor para la restauración (100) y el menor valor se asigna a los parches de ecosistemas con menor número de especies y endemismos.

- b) **Superficie perdida a nivel regional:** Al igual que como se muestra en el criterio “Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO”, en este caso, asumiendo que los ecosistemas con una mayor pérdida de cobertura tienen una mayor prioridad para la restauración, mediante el uso de la **Ecuación 1a**, a los ecosistemas con mayor pérdida de superficie se les asigna el mayor valor (100) y a los menos devastados se les asigna un valor menor.

- c) **Superficie perdida a nivel nacional:** Al igual que como se muestra en el criterio “Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO”, asumiendo que los ecosistemas con mayor pérdida de superficie en el país son prioritarios para la restauración, mediante el uso de la **Ecuación 1a** se le asigna el mayor valor (100) y se le asigna el menor valor para la restauración a los ecosistemas cuya superficie ha sido la menos alterada.

Finalmente estos 3 indicadores son combinados a través de una suma de pesos simple utilizando la **Ecuación 5**, mediante la cual se genera el mapa del criterio “Importancia para la restauración de los ecosistemas presentes en la SMO” (Anexo 22).

$$\mathbf{IRE} = [(\mathbf{VEREE} * 0.40) + (\mathbf{PSR} * 0.32) + (\mathbf{PSN} * 0.28)]$$

Ecuación 5

Donde:

IRE = Mapa de Importancia para la restauración de los ecosistemas presentes en la SMO

VEREE = Mapa de Valor de los ecosistemas por su riqueza y endemismo de especies

PSR = Mapa de Pérdida de superficie a nivel regional

PSN = Mapa de Pérdida de superficie a nivel nacional

Los pesos (W) utilizados en la **Ecuación 5** fueron obtenidos a través de la consulta con expertos.

3.4 Priorización de áreas por la provisión de SE hidrológicos

El Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) se otorga por concepto de “Conservar la cobertura boscosa, la recarga de acuíferos y manantiales así como evitar la erosión del suelo” (Diario Oficial de la Federación 2009).

La región fisiográfica de la SMO forma parte de 4 acuíferos (Anexo 23), 2 grandes regiones hidrológicas conformadas por 3 cuencas hidrográficas divididas en 13 subcuencas (Anexo 24). Los criterios que se utilizaron para evaluar la provisión de servicios hidrológicos se basan en la oferta (de calidad y cantidad de agua) y la demanda del servicio a nivel tanto superficial como subterráneo y son explicados en los siguientes párrafos (Figuras 8, 9 y 10).

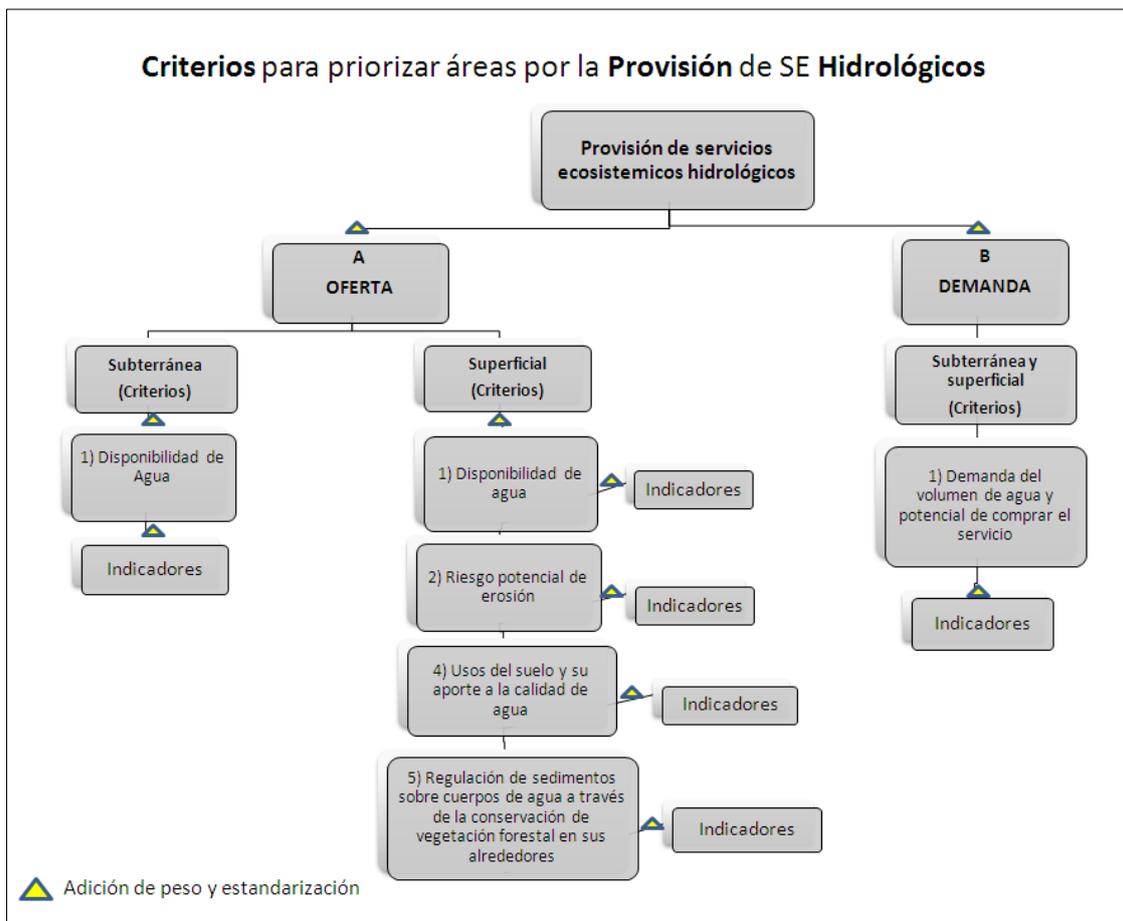


Figura 8. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la provisión de SE hidrológicos.

3.4.1 Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por la oferta de calidad y cantidad de agua

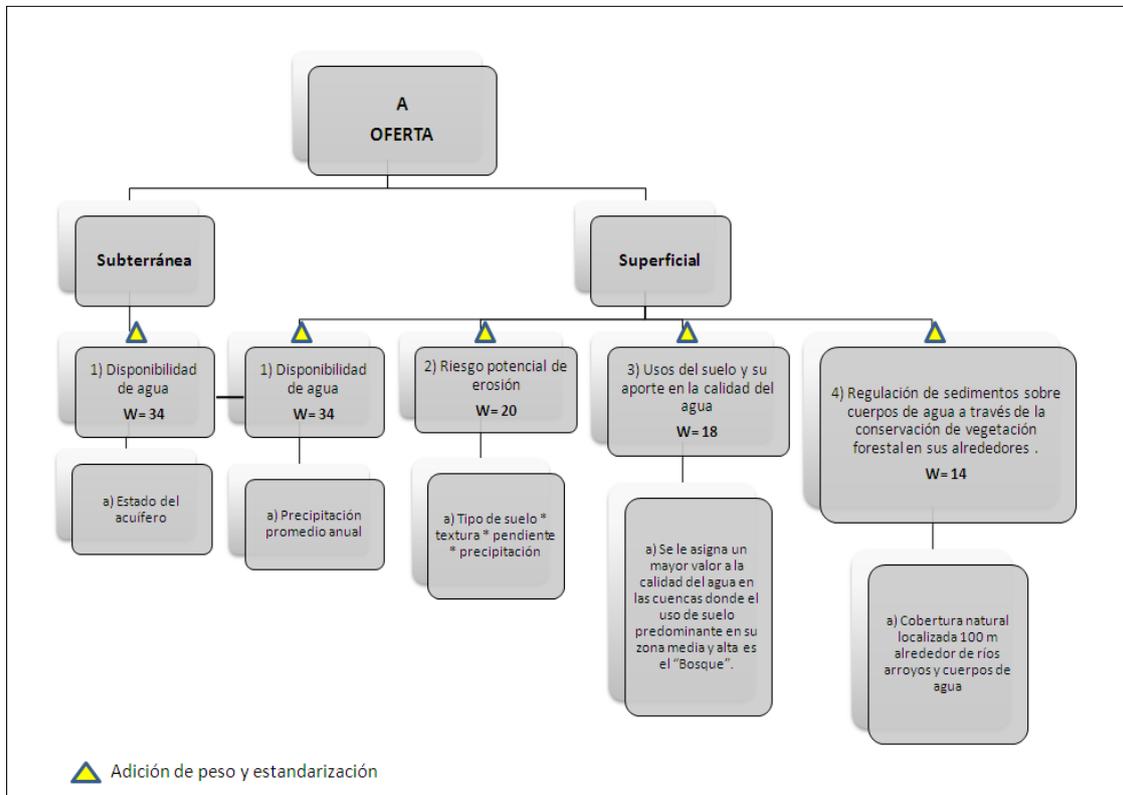


Figura 9. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la oferta de calidad y cantidad de agua con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.

Criterio 1: Disponibilidad de agua

Este criterio está relacionado con la cantidad de agua, para lo cual se utilizan dos indicadores diferentes, uno es para el caso de agua subterránea y el otro para el caso del agua superficial y son explicados a continuación (Figura 9).

- a) Disponibilidad de agua superficial:** La disponibilidad de agua superficial se mide con base en la **precipitación promedio anual**. Acorde al mapa de precipitación en la SMO (UASLP 2006c), en la zona de estudio, se tienen gradientes de precipitación desde los 500 a los 3000 mm (Anexo 25). Para darle peso a este indicador, se les pidió a los expertos asignar un valor para el PSA a las zonas con diferentes gradientes de precipitación.

Sin embargo, en el presente estudio no se encontró diferencia significativa en el valor asignado por los expertos a las zonas con diferentes gradientes de precipitación ($W >61$ y <69). Debido a que este indicador no representó preferencias por parte de los expertos, en este estudio no es utilizado en la identificación espacial de áreas prioritarias para el PSA por la oferta de cantidad de agua.

- b) Disponibilidad de agua subterránea:** La disponibilidad de agua subterránea se mide con base en el **balance entre extracción y recarga del acuífero**. Acorde a el mapa de Delimitación de acuíferos de la República Mexicana (CONAGUA 2009), la región fisiográfica de la SMO forma parte de 4 acuíferos, de los cuales: tres no presentan problema de disponibilidad agua y uno de ellos se encuentra en estado crítico (INEGI 2003, CONAGUA 2008, CONAGUA 2010a, Martínez-Ruiz⁵ 2010).

Para este indicador, se le pidió a los expertos que valoraran la importancia para el PSA de aquellas áreas localizadas en acuíferos cuyo estado es crítico y de aquellas zonas donde no existe problema de disponibilidad de agua subterránea (Cuadro 14, Anexo 26).

Cuadro 14. Valor asignado por los expertos (W) a los acuíferos con base en su disponibilidad de agua.

Estado del acuífero	Valor asignado por los expertos (W)
Óptimo (Huasteca, Tamuín y Buena Vista)	72
Crítico (Río Verde)	82

⁵ Martínez –Ruíz, V.J. 2010. Estado de los acuíferos Huasteca, Tamuín, Buena Vista y Río Verde. (Comunicación personal). División de Geociencias aplicadas, IPICYT (Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica), S.L.P. México.

Criterio 2: Riesgo potencial de erosión

Dentro del contexto de manejo de cuencas, el control de la erosión es una de las opciones viables para reducir el transporte de sedimentos (Palmieri *et al.* 2003). El problema radica en la diversidad de factores que influyen en el proceso de erosión: clima (precipitación, escurrimientos, velocidad y dirección del viento) geotectónica (geología, suelos y actividad tectónica), topografía (pendiente, orientación de la cuenca, área de drenaje y densidad), vegetación, uso del suelo e impactos humanos (Rodney 2000).

A pesar de todos los factores que influyen en la magnitud de erosión que puede presentar una cuenca, el riesgo de erosión potencial (natural) está influido principalmente por los factores climáticos (precipitación), edafológicos (tipo de suelo y textura) y topográficos (pendiente) (FAO 1979). De esta forma, en áreas donde el uso del suelo en la cuenca es estable, la pérdida en la capacidad de almacenamiento de presas y represas es constante pero incrementa cuando existen procesos de deforestación (Rodney 2000).

Acorde a la metodología propuesta por la FAO (1979), para evaluar el riesgo de erosión potencial se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Riesgo} = (R1) (C \text{ unidad}) (C \text{ textura}) (C \text{ pendiente})$$

Donde:

R1= Erosividad de la lluvia acorde al índice de Fournier modificado por Arnoldus (1977).

C unidad= Erodabilidad de las unidades de suelo (acorde a la clasificación de la FAO)

C textura = Erodabilidad de la textura del suelo

C pendiente = Erodabilidad de la pendiente

Con base a todas estas variables, se elaboró un mapa con el riesgo potencial de erosión para la zona correspondiente a la SMO (Anexo 27). Asumiendo que las zonas con mayor riesgo de erosión son prioritarias para la conservación de la cobertura natural, mediante el uso de la **Ecuación 1c**, se le asignó el valor máximo (100) a las zonas con riesgo de erosión muy alto (Cuadro 15, Anexo 28).

Cuadro 15. Valor asignado a las áreas con diferentes grados de erosión potencial.

Riesgo de erosión potencial (FAO 1979)	Perdida (ton/ha/año)	Valor
Bajo o muy bajo	<10	25
Moderado	10 a 50	50
Alto	50 a 200	75
Muy alto	>200	100

Criterio 3: Usos del suelo y su aporte a la calidad del agua

Los suelos forestales actúan como esponjas para el agua de lluvia, permitiendo su lenta filtración hacia el subsuelo y la recarga de los mantos acuíferos, lo que se puede asociar con protección de la calidad del agua y regulación de flujos (UNESCO 2002).

En el presente estudio se asume que dependiendo del uso que predomine en la zona media y alta de una cuenca, la calidad del agua en sus escurrimientos se verá fuertemente afectada. De esta forma, con base en los mapas de vegetación y uso de suelo (UASLP 2006a) y la Carta estatal de hidrología superficial (INEGI 2001), a las subcuencas cuyo uso predominante del suelo en su parte media y alta es Bosque⁶ se le asigna el mayor valor (100) para el PSA y utilizando la **Ecuación 1a**, se le asigna un menor valor a las subcuencas donde el uso predominante no es Bosque⁶ (Cuadro16, Anexo 29).

⁶ Para efectos del presente estudio, se considera bosque a todos los ecosistemas de origen natural cuya composición consta de plantas leñosas, entrando dentro de esta categoría: los bosques templados, selvas, palmares, mezquiales, vegetación secundaria y matorrales.

Cuadro 16. Valor asignado a las subcuencas por la predominancia del uso de suelo Bosque⁶.

SUBCUENCAS	Bosque (%)	Valor
SubcuencaCd	88	100
SubcuencaCf	87	99
SubcuencaHa	82	93
SubcuencaCh	78	89
SubcuencaCe	71	81
SubcuencaCk	68	77
SubcuencaDb	68	77
SubcuencaCg	66	75
SubcuencaCj	62	70
SubcuencaCa	57	65
SubcuencaCb	56	64
SubcuencaDz	33	38
SubcuencaDa	32	36

Criterio 5: Regulación de sedimentos sobre cuerpos de agua a través de la conservación de vegetación forestal en sus alrededores

Existe una fuerte correlación entre deforestación y calidad de agua, algunos estudios indican que la remoción de vegetación en los márgenes de los ríos causa un incremento en la temperatura y en el aporte de sedimentos al agua (Carlson *et al.* 1990, Binkley y Brown 1993).

Si el objetivo es proteger únicamente la estabilidad del suelo, diversos estudios recomiendan un área mínima de 20 a 30 m con respecto al embalse de ríos, arroyos y cuerpos de agua (Haupt y Kidd 1965, Moring 1982, Waterways & Wetlands Works Manual 2003). Otros autores como Wong *et al.* 1982 (citado por Lee *et al.* 2003) establecen que una franja de 60 m es suficiente para el control de la sedimentación. Mientras que Mokondoko y Manson (2010) afirman que los bosques en una franja de 100 metros a la orilla de los ríos ayudan a mantener una alta calidad del agua y por lo tanto son importantes para mejorar la salud de las poblaciones dependientes de este recurso.

Bajo las recomendaciones de los diversos autores citados en los dos párrafos anteriores, en el presente estudio, se prioriza la vegetación forestal que se encuentra dentro de un buffer de 100 metros alrededor de los ríos y cuerpos de agua y automáticamente se les asigna el mayor valor (100) para el PSA (Anexo 30).

3.4.2 Criterios e indicadores para priorizar áreas para el PSA por la demanda de agua

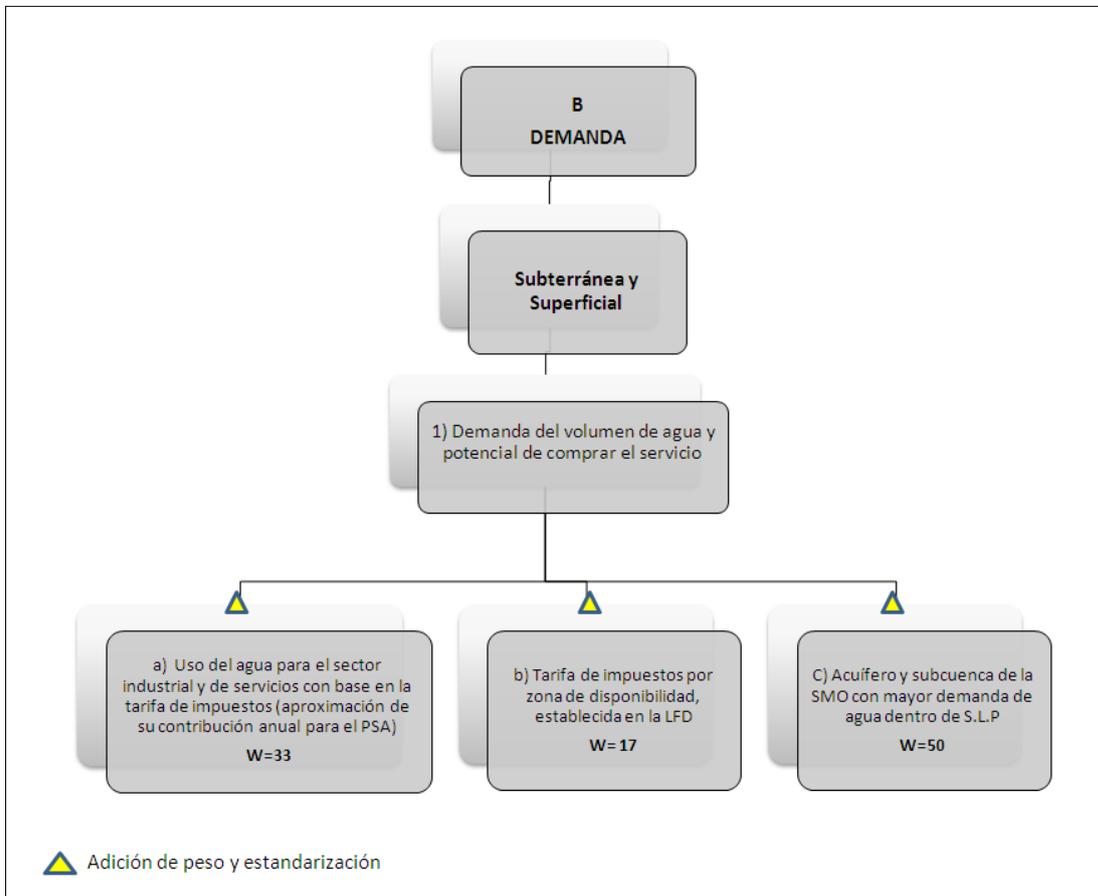


Figura 10. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por la demanda de agua con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.

Asumiendo que un verdadero mecanismo de PSA está definido por los proveedores del servicio y los usuarios del servicio (DE HEK *et al.* 2004 en Pagiola *et al.* 2006), en el presente estudio se trata de identificar aquellas zonas donde la demanda del recurso sea prioritaria debido a la existencia de posibles compradores del servicio.

En el presente estudio se utiliza como referencia las concesiones de agua (uso, volumen y localización geográfica) subterránea y superficial correspondientes a los acuíferos y subcuencas de la zona de estudio (CONAGUA 2010b). El criterio y los indicadores que se utilizan para priorizar áreas para el PSA por la demanda de agua se explican a continuación (Figura 10).

Criterio 1: Demanda del volumen de agua y potencial de comprar el servicio

En México, el gobierno federal cobra por el aprovechamiento de los bienes de la nación a través de la Ley Federal de Derechos (LFD). Dicha Ley en sus artículos 222, 223 y 224 establece las tarifas que pagan diferentes tipos de usuarios del agua, las cuales se pueden resumir de esta manera: los agricultores no pagan nada, los municipios muy poco y las tarifas más altas son para el resto de los usuarios, principalmente empresas manufactureras (industrias) y de servicios (Diario Oficial de la Federación 2003b).

Así mismo, en los artículos 222 y 223 de la LFD se establece que están obligadas al pago del derecho sobre agua, las personas físicas y las morales que usen, exploten o aprovechen aguas nacionales, de acuerdo con la zona de disponibilidad de agua en que se efectúe su extracción de conformidad a la división territorial contenida en el artículo 231 de esa Ley.

De los ingresos que se obtengan por la recaudación de los derechos por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales por usuarios distintos de los municipales y organismos operadores de los mismos, 300 millones de pesos tendrán destino específico para el Fondo Forestal Mexicano para el desarrollo y operación de Programas de Pago por Servicios Ambientales, estos recursos ampliarán el presupuesto que se asigne a la Comisión Nacional Forestal (Diario Oficial de la Federación 2003b).

Tomando como referencia lo expuesto anteriormente, para darle valor a este criterio se tienen 3 indicadores:

- a) **Uso de agua para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA):** En este indicador se utiliza como base el volumen de agua consumido por los usuarios mayoritarios del agua (industrial y servicios) en cada una de las subcuencas y los acuíferos que corresponden a la zona de estudio.

Tomando como referencia lo establecido por la LFD, la tarifa de impuestos establecida para los usuarios del agua en el estado de San Luis Potosí (Cuadro

17) y lo que establece la Ley de Aguas Nacionales con respecto a los usos del agua (Diario Oficial de la Federación 1992); utilizando la **Ecuación 1a**, se le asigna el mayor valor para el PSA a las subcuencas y acuíferos donde existe una mayor extracción de agua para usuarios mayoritarios con base en su potencial como compradores del servicio y el menor valor es asignado a aquellos donde no existe extracción de agua para uso industrial y de servicios (Cuadros 18 y 19, Anexos 31 y 32).

Cuadro 17. Tarifas de agua potable en el Estado de San Luis Potosí (CONAGUA 2007).

Usos del agua	Tarifa mínima de agua (\$ mexicanos) por m3 al año
Industrial (incluye termoeléctricas)	330.000
Servicios	219.000
Público-urbano (incluye generación de energía hidroeléctrica)	52.100
Agropecuario	0.130

Cuadro 18. Valor asignado por la contribución aproximada de usuarios mayoritarios del agua y su potencial para la compra del servicio en cada acuífero de la SMO dentro de SLP.

ACUÍFERO	Volumen (m3/año) para uso industrial y de servicios	Contribución aprox.(\$ Mex)	Valor
Huasteca	1069117	352808610	100
Tamuín	937662	309428460	88
Río Verde	142142	46906860	13
Buena Vista	0	0	1

Cuadro 19. Valor asignado por la contribución aproximada de usuarios mayoritarios del agua y su potencial para la compra del servicio en cada subcuenca de la SMO dentro de SLP.

SUBCUENCA	Volumen (m3/año) para uso industrial y de servicios	Contribución aprox. (\$ Mex)	Valor
Subcuenca Ce (El Salto)	392263860	129447073800	100
Subcuenca Da (Moctezuma)	19011404	6273763320	50
Subcuenca Ca (Tampaón)	17537600	5787408000	40
SubcuencaCb (Río Valles)	4068050	1342456500	10
Subcuenca Cg (Río Gallinas)	2834632	935428560	7
SubcuencaDb (Tancuilín)	234280	77312400	5
Subcuenca Ch (Río Verde)	182837	60336210	4
SubcuencaDz (Tempoal)	1000	330000	2
Subcuenca Ha (C.d del Maíz)	0	0	1
Subcuenca Cd (Río Los gatos)	0	0	1
Subcuenca Cf (Tamasopo)	0	0	1
SubcuencaCj (Santa María)	0	0	1
SubcuencaCk (Huichihuayan)	0	0	1

Finalmente los mapas de “Uso de agua subterránea para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA)” y “Uso de agua superficial para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA), son combinados a través de una suma de pesos simple utilizando la **Ecuación 6**, mediante la cual se genera el mapa del indicador “Uso de agua para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA)” (Anexo 33).

$$\text{UAUMPC} = [(\text{UAUMPC}_{\text{sub}} * 0.50) + (\text{UAUMPC}_{\text{sup}} * 0.50)]$$

Ecuación 6

Donde:

UAUMPC = Mapa de Uso de agua para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA)

UAUMPC_{sub} = Mapa de Uso de agua subterránea para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aprox. de su contribución anual para el PSA)

UAUMPC_{sup} = Mapa de Uso de agua superficial para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aprox. de su contribución anual para el PSA)

El peso utilizado en la **Ecuación 6** se asigna con base en la equidad de importancia para el recurso a nivel subterráneo y superficial (pesos iguales).

- b) Tarifa de impuestos por zona de disponibilidad establecida en la LFD:** La Ley Federal de Derechos establece que “Por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales (provenientes de fuentes superficiales o extraídas del subsuelo, a excepción de las del mar) se pagará el derecho sobre agua, de conformidad con la zona de disponibilidad de agua en que se efectúe su extracción. De esta forma, asumiendo que en las zonas con una mayor tarifa de impuestos del agua existe un mayor potencial de compra del servicio, utilizando la **Ecuación 1a**, se asigna el mayor valor a los municipios localizados dentro de las zonas de disponibilidad con las tarifas más altas por metro cúbico de agua y el menor valor se le asigna a las zonas con menor tarifa (Cuadro 20, Anexo 34).

Cuadro 20. Valor asignado por la tarifa de agua en cada zona de disponibilidad y el potencial para la compra del servicio.

Zona de disponibilidad	Cuota (por cada metro cúbico de agua)	Valor
I	\$18.2894	100
II	\$14.6310	80
III	\$12.1924	67
IV	\$10.0589	55
V	\$7.9248	43
VI	\$7.1623	39
VII	\$5.3909	29
VIII	\$1.9153	10
IX	\$1.4354	8

- c) **Acuíferos y subcuencas de la SMO con mayor demanda de agua dentro del estado de San Luis Potosí:** Un verdadero esquema de PSA debe de crear mecanismos para que los usuarios del servicio (en este caso los usuarios del agua) compensen monetariamente a los dueños de tierras cuyo uso del suelo es benéfico para la calidad del agua que consumen.

Con base en este supuesto, en el presente estudio se toma como referencia el volumen de agua extraído a nivel subterráneo y a nivel superficial, de manera que utilizando la **Ecuación 1a**, se le asigna el mayor valor a los acuíferos o subcuencas con un mayor volumen de agua extraído, sin discriminar el tipo de usuario y el menor valor se les asigna a aquellos con menor demanda (Cuadro 21 y 22, Anexos 35 y 36).

Cuadro 21. Valor asignado a cada acuífero por la extracción total de agua al año

ACUÍFERO	Volumen extracción total(m3/año)	Valor
Río Verde	84968475.2	100
Buena Vista	17506820	21
Huasteca	17149894.5	20
Tamuín	6091701.41	7

Cuadro 22. Valor asignado a cada subcuenca por la extracción total de agua al año

SUBCUENCA	Volumen extracción total (m3/año)	Valor
Subcuenca Ce	512210866	100
Subcuenca Ca	170181067	33
Subcuenca Da	84493001.8	16
SubcuencaCb	42448728.9	8
Subcuenca Ch	39688011	8
Subcuenca Cg	30400479.4	6
SubcuencaDb	8652727.35	2
Subcuenca Cd	7000610	2
Subcuenca Ha	6365964.5	2
SubcuencaDz	5228819	1
SubcuencaCk	1247759	1
SubcuencaCj	819509.25	1
Subcuenca Cf	183987	1

Finalmente los mapas de “Acuífero con mayor demanda de agua” y “Subcuenca con mayor demanda de agua” son combinados a través de una suma de pesos simple utilizando la **Ecuación 7**, mediante la cual se genera el mapa del indicador “Acuífero y subcuenca de la SMO con mayor demanda de agua dentro del estado de San Luis Potosí” (Anexo 37).

$$\text{DASLP} = [(\text{DAsub} * 0.50) + (\text{DAsup} * 0.50)]$$

Ecuación 7

Donde:

DASLP = Mapa de Acuífero y subcuenca de la SMO con mayor demanda de agua dentro del estado de San Luis Potosí

DAsub = Mapa de Acuífero con mayor demanda de agua

DAsup = Mapa de Subcuenca con mayor demanda de agua

El peso utilizado en la **Ecuación 7** se asigna con base en la equidad de importancia para el recurso a nivel subterráneo y superficial (pesos iguales).

3.5 Priorización de áreas por el riesgo o amenaza de perder los SE

Hartshorn *et al.* (2005) establece que “Pagar por la conservación de los bosques en zonas donde no es necesario aplicar medidas de protección es una forma de gastar ineficientemente los fondos destinados a la conservación”.

Debido a que cierto tipo de cambios en el uso de la tierra y prácticas de manejo representan amenazas a la provisión de servicios ambientales; el nivel de riesgo o amenaza se debe tomar en cuenta. En el presente estudio, la principal amenaza a la conservación del bosque se considera como la distribución espacial del riesgo de deforestación y los criterios establecidos para dicho objetivo se explican a continuación (Figura 11).

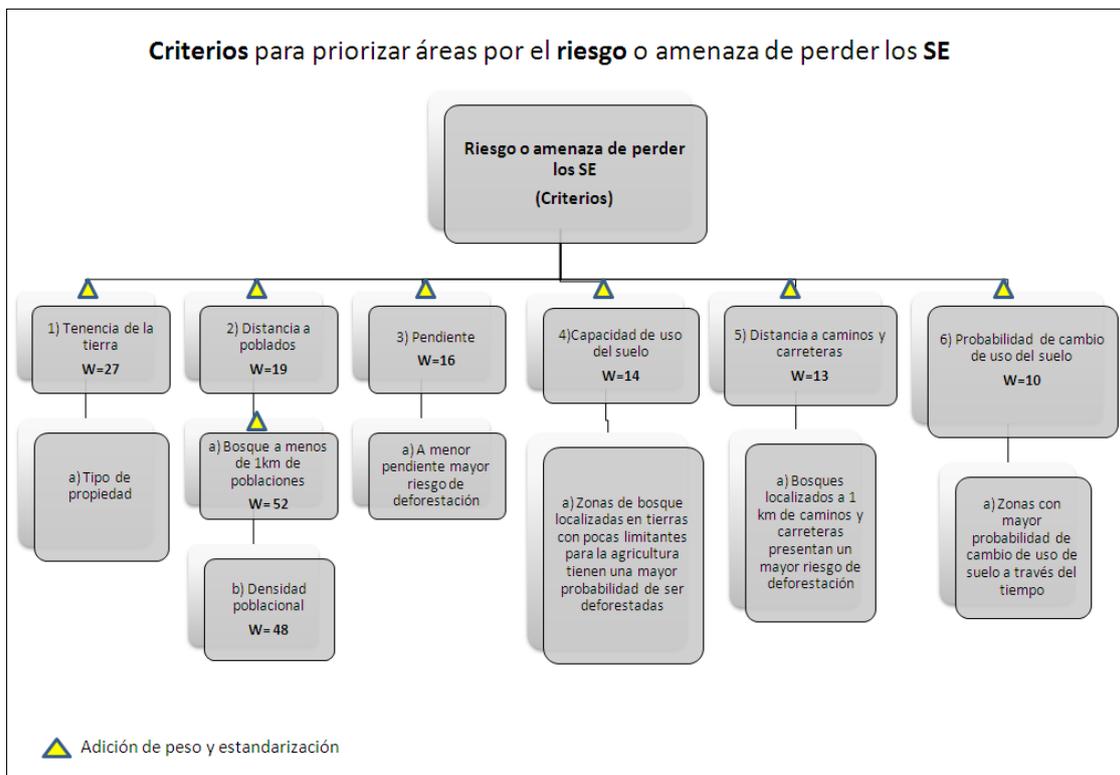


Figura 11. Estructura jerárquica para priorizar áreas para el PSA por el riesgo o amenaza de perder los SE con el peso asignado por los expertos (W) para los indicadores y criterios.

Criterio 1: Tenencia de la tierra

En México entre el 60 y 80% de los bosques tienen un tipo de propiedad comunal o ejidal (INE 2009). Esto se explica debido a que cuando se llevó a cabo la repartición de tierras, los terrenos con menor superficie, menos accesibles y menos aptos para fines agropecuarios le fueron asignados a propietarios de origen indígena, quedando los mejores terrenos (propiedad privada) para los grandes terratenientes que generalmente pertenecían a la población mestiza y aristócrata.

En la SMO aproximadamente más del 30 % de la población es indígena (Reyes *et al.* 2009) y se encuentra asentada principalmente al sur de esta gran región fisiográfica donde el relieve es altamente escarpado. En este extremo de la SMO es muy común encontrar terrenos deforestados a raíz de la práctica agrícola tradicional de Rosa, Tumba y Quema (Observación en campo). Esto es una situación que provoca una alta degradación del suelo ya que son suelos arcillosos y la precipitación es constante todo el año (Observación en campo).

Las poblaciones indígenas de esta zona presentan un nivel socioeconómico con grado de marginación bajo a muy bajo (UASLP 2006d) y depende en su mayoría de la agricultura para su subsistencia (observación de campo), a pesar de estar asentados en zonas que presentan muchas limitantes para dicha actividad (INEGI 1984). Así mismo, acorde a Reyes y colaboradores (2009), el grado de marginación es una variable muy asociada al cambio de uso del suelo en la región fisiográfica de la SMO.

Aunque la finalidad de un PSA no es combatir la pobreza, en estas condiciones podría ser un mecanismo muy efectivo para la conservación y una mejora en la economía de las comunidades indígenas.

Acorde al Mapa de tenencia de la tierra (UASLP 2006e), en la SMO no existen tierras de propiedad federal (a excepción de los embalses de ríos, cuerpos de agua y orillas de carreteras) únicamente existen terrenos de propiedad privada y ejidal o comunal. Asumiendo que el tipo de propiedad tiene una correlación directa con el nivel de marginación y este con el riesgo de deforestación debido a la necesidad de abrir terrenos para la agricultura, se le pidió a los expertos que asignaran un valor a los tipos

de propiedad, donde acorde a su experiencia el PSA tendría mayor efecto en la protección de la cobertura forestal (Cuadro 23, Anexo 38).

Cuadro 23. Valor asignado por los expertos (W) para el PSA, a los diferentes tipos de propiedad por el riesgo de deforestación.

Tipo de propiedad	Valor
Comunal y ejidal	76
Privada	58

Criterio 2: Distancia a poblados

La superficie de bosque más cercana a poblaciones suele ser la más propensa a la deforestación y degradación debido a su cercanía y accesibilidad, así como a la expansión de infraestructura rural o urbana (Geist y Lambin 2001). En este sentido, para darle valor a este criterio, se utilizan principalmente 2 indicadores (Figura 11), los cuales se explican a continuación:

- a) **Bosque cercano a poblados:** Se toma como base la metodología empleada por Leclerc y Rodríguez (1996), los cuales indican que el bosque localizado a 1 km de distancia con respecto a las poblaciones es el más propenso a ser deforestado. De esta forma, con base en los mapas de vegetación y uso de suelo en la SMO (UASLP 2006a), al bosque localizado a menos de un kilómetro de poblaciones, en el presente estudio se le asignó el mayor valor (100) para el PSA por su riesgo de deforestación (Anexo 39).
- b) **Densidad poblacional:** Con base en el mapa de densidad poblacional en la SMO (UASLP 2006f), existen zonas sin habitantes hasta zonas con densidad de más de 6000 habitantes por kilómetro cuadrado. Asumiendo que las zonas más pobladas son las más propensas a la deforestación, se utiliza la **Ecuación 1a** donde el mayor valor para el PSA por el riesgo de deforestación se le asigna a las zonas con mayor densidad poblacional y el menor valor a las zonas de menor densidad (Cuadro 24, Anexo 40).

Cuadro 24. Valor asignado a las zonas con mayor riesgo de deforestación por su densidad poblacional.

Densidad poblacional (no. Habitantes x km2)	Valor
Sin habitantes	1
Menor a 100 hab.	2
Entre 101 y 200 hab	2
Entre 201 y 300 hab	3
Entre 301 y 400 hab	5
Entre 401 y 500 hab	7
Entre 501 y 600 hab	9
Entre 601 y 700 hab	11
Entre 701 y 800 hab	13
Entre 801 y 900 hab	15
Entre 901 y 1000 hab	17
Entre 1001 y 2000 hab	33
3000	50
4000	67
5000	87
≥6000	100

Finalmente estos 2 indicadores son combinados a través de una suma de pesos simple utilizando la **Ecuación 8**, mediante la cual se genera el mapa del criterio “Distancia a poblados” (Anexo 41).

$$\text{Distancia poblados} = [(\text{Cercanía P} * 0.52) + (\text{Densidad P} * 0.48)]$$

Ecuación 8

Donde:

Distancia poblados= Mapa de riesgo de deforestación por distancia a poblados

Cercanía P= Mapa de bosque a menos de 1 km de poblaciones

Densidad P = Mapa de riesgo de deforestación por la densidad poblacional

Los pesos (W) utilizados en la **Ecuación 8** fueron obtenidos a través de la consulta con expertos.

Criterio 3: Pendiente

Existe una fuerte correlación entre cambio de uso del suelo y nivel de pendiente (Geist y Lambin 2001, Reyes *et al.* 2009). Con base en el mapa de pendientes en la SMO (UASLP 2006g), en esta región se tienen pendientes desde 0% hasta el 50%. Mediante la utilización de la **Ecuación 1b**, se le asigna el mayor valor (100) para el PSA por el riesgo de deforestación a los bosques localizados en las zonas con menor

pendiente y el menor valor es asignado a las zonas de mayor pendiente (Cuadro 25, Anexo 42).

Cuadro 25. Valor asignado a las zonas con mayor riesgo de deforestación con base en la pendiente.

Pendiente (%)	Valor
0 a 3	100
3 a 8	85
8 a 15	70
15 a 30	55
30 a 50	40
50 a 75	25
>75	10

Criterio 4: Distancia a caminos y carreteras

Debido a que la apertura de caminos y principalmente de carreteras, es un factor causante de cambio de uso del suelo. Acorde a la metodología empleada por Leclerc y Rodríguez (1996), el bosque localizado 1km alrededor de caminos y carreteras presenta mayor riesgo de ser deforestado, por lo tanto, para efectos del presente estudio, se le asignó el mayor valor (100) para el PSA por el riesgo de deforestación (Anexo 43)

Criterio 5: Capacidad de uso del suelo

Acorde a la clasificación de la capacidad agrológica de los suelos elaborada por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA 1961), las limitaciones que restringen el uso de un suelo son las guías principales para establecer las clases de capacidad de uso. Los criterios que se consideran generalmente para determinar la capacidad agrológica son: profundidad efectiva, textura del horizonte superficial, conductividad hidráulica, clase de drenaje, capacidad de retención de agua disponible para las plantas, pendiente, riesgo de erosión, riesgo de inundación, salinidad, alcalinidad, sustancias tóxicas, periodo libre de heladas e índices climáticos.

Se asume que el bosque localizado en zonas con pocas limitantes para uso agrícola o pecuario tienen una probabilidad mayor de ser deforestadas, por lo tanto, mediante el uso de la **Ecuación 1c**, se le asigna el mayor valor (100) para el PSA por su

riesgo de deforestación y el menor valor se asigna a las zonas con mayores limitantes para actividades agropecuarias (Cuadro 26, Anexo 44).

Cuadro 26. Valor asignado a las zonas con mayor riesgo de deforestación con base en la clase de capacidad agrológica.

Clase de Capacidad	Intensidad en el uso	Valor
I	Uso potencial para cualquier tipo de actividad, se permite desde un uso pecuario y agrícola muy intenso, hasta un uso forestal o para la conservación de la vida silvestre.	100
II	Uso potencial desde pecuario y agrícola intenso hasta un uso forestal o para la conservación de la vida silvestre.	88
III	Uso potencial desde pecuario y agrícola moderado hasta un uso forestal y de vida silvestre.	76
IV	Uso pecuario y agrícola limitado hasta un uso forestal o para la conservación de la vida silvestre	64
V	Uso potencial para la vida silvestre, uso forestal y hasta pecuario intenso pero no es apto para fines agrícolas	52
VI	Uso potencial de vida silvestre, forestal y hasta pecuario moderado	40
VII	Uso potencial para la conservación de vida silvestre, forestal y pecuario limitado	28
VIII	Uso exclusivo para conservación de la vida silvestre	16

Criterio 6: Probabilidad de cambio de uso del suelo

En la región fisiográfica de la SMO, Reyes y colaboradores (2009) realizaron un análisis multitemporal para conocer cuáles fueron las zonas con mayor cambio en el uso del suelo y las zonas con mayor probabilidad de cambio de uso en el futuro año 2020.

Se tomó como base el Mapa de probabilidad de cambio de uso del suelo (UASLP 2006h), donde a las zonas con mayor probabilidad de cambio de uso de suelo se les asignó el valor mayor (100), pues se asume que son las que corren mayor riesgo de deforestación con base en antecedentes históricos y una futura probabilidad de cambio de uso (Anexo 45).

3.6 Análisis de correlación y sensibilidad

La autocorrelación espacial es una medida de la relación entre las diferencias espaciales de los atributos de objetos diferentes entre sí. Es simplemente una medida de las similitudes de los atributos de una serie de Cij con similitudes localizadas, las cuales son resumidas como resultado de un coeficiente (Goodchild 1986 en ArcInfo 9.0).

La fórmula para calcular el índice de correlación espacial es:

$$c = \frac{\sum_k^n c_{ij}}{(\text{sqrt}(\sum_k^n (z_i - \bar{z}_i)^2) * \text{sqrt}(\sum_k^n (z_j - \bar{z}_j)^2))}$$

Donde:

n- número total de celdas en el grid: filas * columnas

i- cualquier celda del primer grid de salida

j- cualquier celda del segundo grid de salida que esta desplazado de su lugar en i, por el x-, y- específicamente desplazado

zi- valor del atributo de la celda i

zj= valor del atributo de la celda j

\bar{z}_i = el mayor valor del atributo del primer grid

\bar{z}_j - el mayor valor del atributo del segundo grid

cij- Similitud de los atributos de i y j

En el presente estudio se realizó con ayuda del software ArcInfo 9.0 un análisis de autocorrelación espacial (r) entre los mapas de indicadores y criterios con la finalidad de identificar si alguno de estos está siendo redundante en la valorización espacial de cualquiera de los objetivos para los cuales han sido establecidos.

Es importante dejar claro lo que algunos autores reconocen que “en muchas ocasiones los tomadores de decisiones (que en este caso son los expertos) carecen de un juicio exacto en la asignación de valor (peso) a los criterios evaluados, esto junto con la poca existencia de información y su limitada precisión (Saaty 1980 y Keeney 1980 en Malczewski 1999). Por lo tanto el valor incierto (error) de una preferencia puede

definirse como: la diferencia entre el valor medido (asignado por los tomadores de decisión) y el verdadero valor (Malczewski 1999).

Por esta razón, es necesario llevar a cabo un análisis de sensibilidad, el cual permite corroborar si los cambios en las entradas o “inputs” (que serían los atributos y preferencias de los tomadores de decisiones) no afectan los resultados o “outputs” (Malczewski 1999).

Siguiendo estas recomendaciones, para efectos del presente estudio, con ayuda del software ArcGis 9.0 se realizó un análisis de sensibilidad comparando la similitud espacial entre los “outputs” con el peso asignado por los expertos (W) y los “outputs” con pesos iguales.

Los análisis de correlación espacial y de sensibilidad se discuten en el apartado 4.2 del presente estudio.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados: Identificación espacial de áreas prioritarias para la conservación y el PSA en la SMO

En las siguientes ecuaciones se muestran los modelos del proceso general para la obtención de cada uno de los objetivos propuestos en el presente estudio:

Oferta biodiversidad

$$\Sigma [(criterio\ 1 * W1), (criterio\ 2 * W2) \dots (criterio\ n\ Wn)] \quad \text{Ecuación 9}$$

Implementar SAF

$$\Sigma [(criterio\ 1 * W1), (criterio\ 2 * W2) \dots (criterio\ n\ Wn)] \quad \text{Ecuación 10}$$

Oferta agua

$$\Sigma [(criterio\ 1 * W1), (criterio\ 2 * W2) \dots (criterio\ n\ Wn)] \quad \text{Ecuación 11}$$

Demanda agua

$$\Sigma [(criterio\ 1 * W1), (criterio\ 2 * W2) \dots (criterio\ n\ Wn)] \quad \text{Ecuación 12}$$

Riesgo SE

$$\Sigma [(criterio\ 1 * W1), (criterio\ 2 * W2) \dots (criterio\ n\ Wn)] \quad \text{Ecuación 13}$$

PSA biodiversidad

$$[(Oferta\ biodiversidad * Wbd) + (Riesgo\ SE * Wrse)] \quad \text{Ecuación 14}$$

PSA hidrológicos

$$\Sigma [(Oferta\ agua * Wh), (Demanda\ agua * Wdh), (Riesgo\ SE * Wrse)] \quad \text{Ecuación 15}$$

Provisión SE

$$[(Oferta\ biodiversidad) + (Oferta\ agua)] \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

Criterio n = Peso del mapa del criterio utilizado para definir un objetivo

Wn= Peso del criterio utilizado para definir un objetivo

Wbd= Peso de la oferta por servicios ambientales derivados de la conservación de la biodiversidad

Wh= Peso de la oferta de servicios ambientales hidrológicos

Wdh= Peso de la demanda de servicios ambientales hidrológicos

Wrse= Peso del riesgo o amenaza de perder los servicios ambientales

Oferta biodiversidad= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE derivados de la conservación de biodiversidad

Implementar SAF= Peso del Mapa de áreas prioritarias para implementar SAF

Oferta agua= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE hidrológicos

Demanda agua= Peso del Mapa de áreas prioritarias por la demanda de SE hidrológicos

Riesgo SE= Peso del Mapa de áreas prioritarias por el riesgo de perder los SE

PSA biodiversidad= Peso del Mapa de áreas prioritarias para PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de biodiversidad

PSA hidrológicos= Peso del Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos

Provisión SE= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE

De esta manera se obtuvieron los mapas resultantes (output principales y output finales) de la oferta, demanda y riesgo de perder cada uno de los SE evaluados. Posteriormente se optó por reclasificar los valores continuos de los resultados en valores discretos, con la finalidad de identificar con mayor facilidad el nivel de prioridad de las áreas para el PSA en la zona de estudio. Los valores asignados a cada una de las categorías de prioridad se muestran en la Cuadro 27.

Cuadro 27. Categorías de nivel de prioridad para el PSA en la SMO

Prioridad	Valor
Muy baja	0 - 20
Baja	20 - 40
Media	40- 60
Alta	60 - 80
Muy alta	80 - 100

Una vez clasificados los mapas finales (output) en los diferentes niveles de prioridad para el PSA, se calculó la superficie correspondiente a cada nivel, multiplicando el área de cada pixel por el número de pixeles en cada categoría de priorización.

En los siguientes apartados se explican los resultados de los mapas elaborados para cada uno de los objetivos propuestos en el presente estudio.

4.1.1 Identificación espacial de la oferta relativa de servicios ambientales derivados de la conservación de la biodiversidad

El Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad (Figura 12), es el resultado de una combinación a través de la suma de pesos simple utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Oferta biodiversidad} = [(ICE * 0.33) + (EC * 0.24) + (PAI * 0.18) + (PAR * 0.15) + (CT * 0.10)]$$

Ecuación 9

Donde:

Oferta biodiversidad= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE derivados de la conservación de biodiversidad

ICE = Peso del Mapa de Importancia para la conservación de los ecosistemas en la SMO

EC= Peso del Mapa de Distribución de especies importantes para la conservación

PAI= Peso del Mapa de Calidad del paisaje

PAR = Peso del Mapa de Calidad del parche

CT= Peso del Mapa de Complejidad del terreno

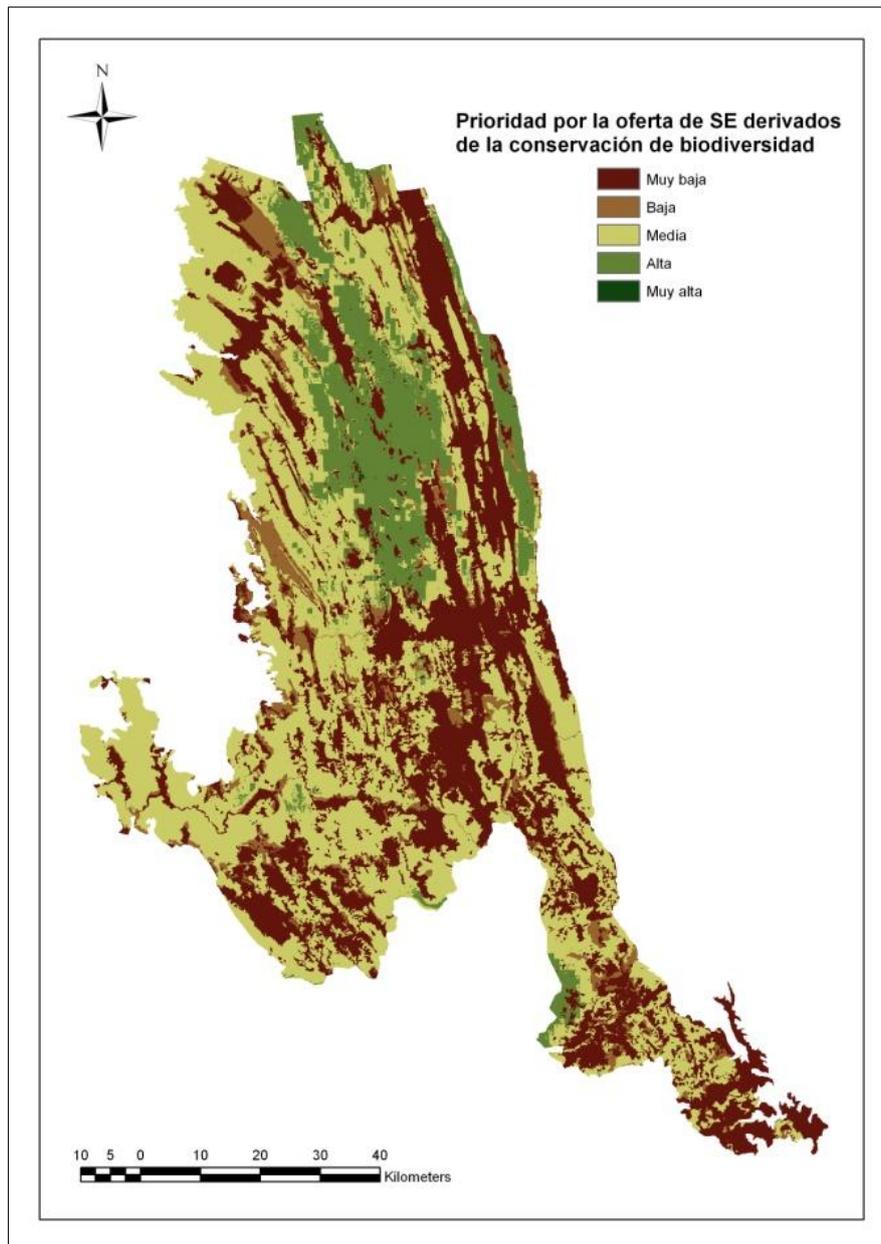


Figura 12. Mapa de áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.

Cuadro 28. Superficie priorizada para el PSA en la SMO por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Muy baja	259637.06	33.7
Baja	55190.75	7.2
Media	353371.13	46
Alta	97769.81	13
Muy alta	120.38	0.1

Como se muestra en la Figura 12 y el Cuadro 28, las áreas de Muy alta prioridad para el PSA por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad se localizan principalmente en pequeñas superficies al centro-norte de la SMO, coincidiendo principalmente con zonas de bosque mesófilo de montaña y zonas donde el terreno es altamente complejo. Mientras que las zonas de Alta prioridad se distribuyen principalmente al norte y al sur de la SMO, coincidiendo en gran parte con las zonas de alta probabilidad de presencia del jaguar y que están prácticamente sin fragmentar.

Aunque lo que trata de indicar el modelo es que en esos sitios de Alta a Muy alta prioridad, es donde coinciden los valores máximos de todos los criterios evaluados para dicho objetivo.

4.1.2 Identificación espacial de Áreas prioritarias para implementar SAF

El Mapa de áreas prioritarias para implementar SAF (Figura 13), resulta de una combinación a través de la suma de pesos simple utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Implementar SAF} = [(CU * 0.37) + (DEB * 0.25) + (RC * 0.21) + (IRE * 0.17)]$$

Ecuación 10

Donde:

Implementar SAF= Peso del Mapa de áreas prioritarias para implementar SAF

CU = Peso del Mapa de Conflicto en el uso del suelo

DEB= Peso del Mapa de Disminuir efecto de borde en parches de ecosistemas naturales

RC= Peso del Mapa de Restablecer la conectividad entre parches de ecosistemas naturales al menor costo

IRE= Peso del Mapa de Importancia para la restauración de los ecosistemas en la SMO

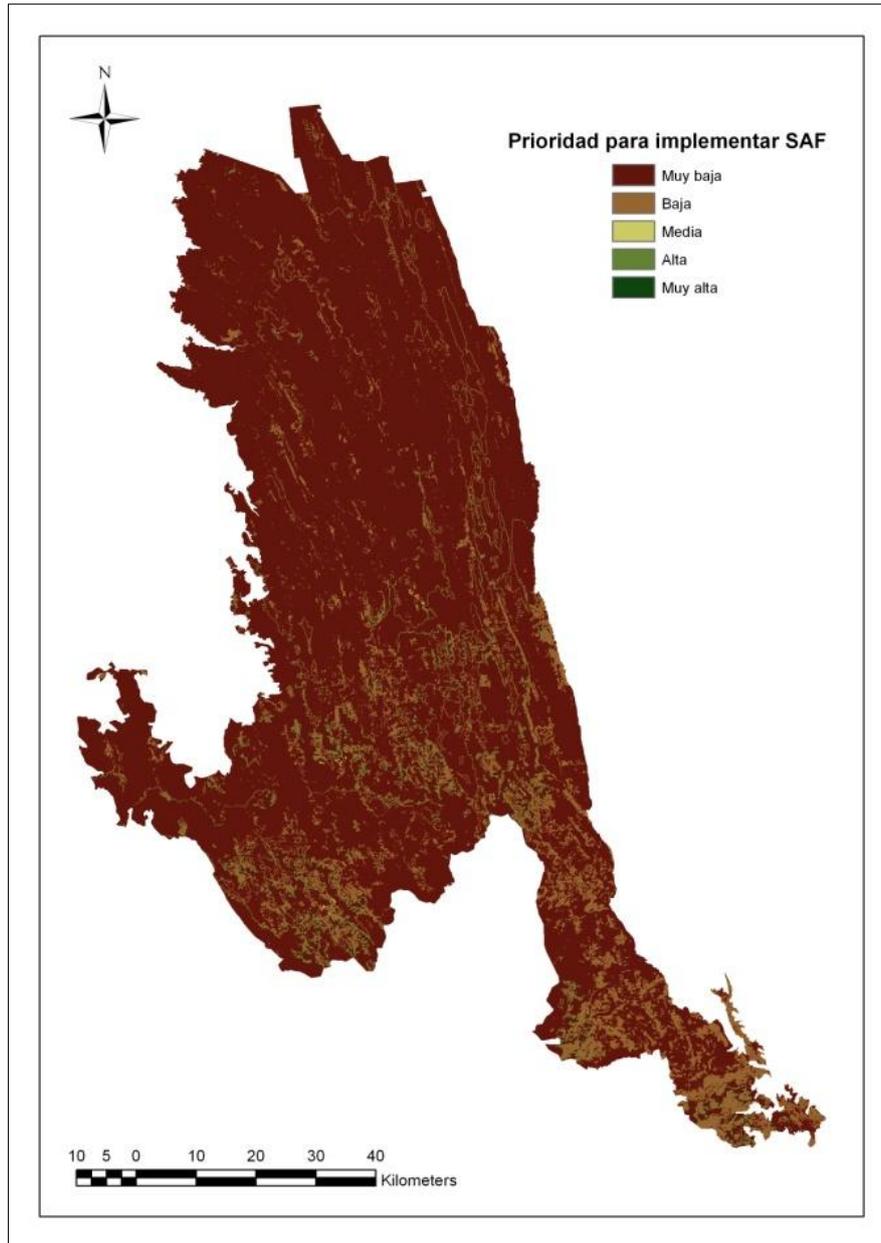


Figura 13. Mapa de áreas prioritarias para implementar SAF.

Cuadro 29. Superficie priorizada para el PSA por la implementación de SAF en la SMO.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Muy baja	656396.44	85.2
Baja	95620.44	12.4
Media	301.69	0.2
Alta	17215.94	2.2
Muy alta	106.88	0.1

Como se muestra en la Figura 13 y el Cuadro 29, las áreas de Muy alta y Alta prioridad para el PSA por implementar SAF se distribuyen principalmente al sur y al este de la SMO y son pequeñas superficies de uso agropecuario que coinciden principalmente con los bordes de ecosistemas naturales y las redes de conectividad. Aunque lo que trata de explicar el modelo es que dichas zonas se localizan donde coinciden los valores máximos de todos los criterios evaluados para este objetivo.

4.1.3 Identificación espacial de la oferta relativa de servicios ambientales hidrológicos

El Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE hidrológicos (Figura 14), es el resultado de una combinación a través de la suma de pesos simple utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Oferta agua} = [(DISPA * 0.34) + (RE * 0.20) + (USC * 0.18) + (RSCA * 0.14)]$$

Ecuación 11

Donde:

Oferta agua= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de agua.

DISPA= Peso del Mapa de Disponibilidad de agua

RE= Peso del Mapa de Riesgo potencial de erosión

USC= Peso del Mapa de Usos del suelo y su aporte a la calidad del agua

RSCA= Peso del Mapa de Regulación de sedimentos sobre cuerpos de agua a través de la conservación de vegetación forestal en sus alrededores

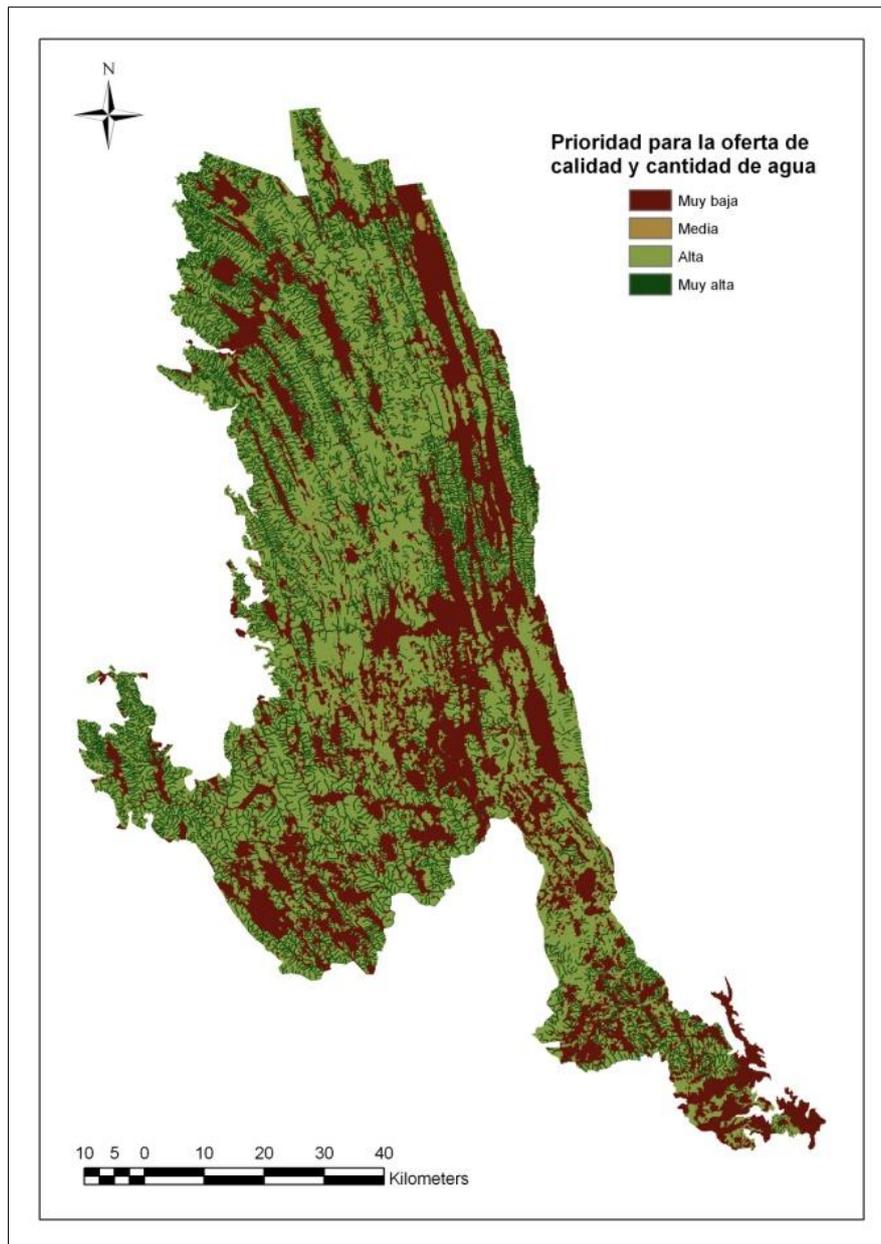


Figura 14. Mapa de áreas prioritarias para la oferta de agua.

Cuadro 30. Superficie priorizada para el PSA por la oferta de agua en la SMO.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Muy baja	244559.75	31.8
Baja	0.00	0
Media	4610.63	0.6
Alta	372257.88	48.3
Muy alta	148040.13	19.2

Como se muestra en la Figura 14 y el Cuadro 30, las áreas de Muy alta prioridad para el PSA por la oferta de SE hidrológicos se localizan a lo largo de toda la SMO principalmente en los bosques de las márgenes de ríos, arroyos y cuerpos de agua. Mientras que las áreas de Alta prioridad ocupan la mayor superficie dentro de la SMO y se distribuyen a lo largo de la misma.

4.1.4 Identificación espacial de la demanda relativa de servicios ambientales hidrológicos

El Mapa de áreas prioritarias por la demanda de SE hidrológicos (Figura 15), es valorizado a través del criterio “Demanda del volumen de agua y potencial de comprar el servicio”. Dicho criterio es valorizado por 3 indicadores, los cuales son combinados a través de la suma de pesos simple utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Demanda agua} = [(\text{UAUMPC} * 0.33) + (\text{IZD} * 0.17) + (\text{DASLP} * 0.50)]$$

Ecuación 12

Donde:

Demanda agua= Peso del Mapa de áreas prioritarias por la demanda de agua.

UAUMPC = Peso del Mapa de Uso de agua para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos y la aproximación de su contribución anual para el PSA

IZD= Peso del Mapa de Tarifa de impuestos por zona de disponibilidad establecida en la LFD

DASLP= Peso del Mapa de Acuíferos y subcuencas de la SMO con mayor demanda de agua dentro del estado de San Luis Potosí

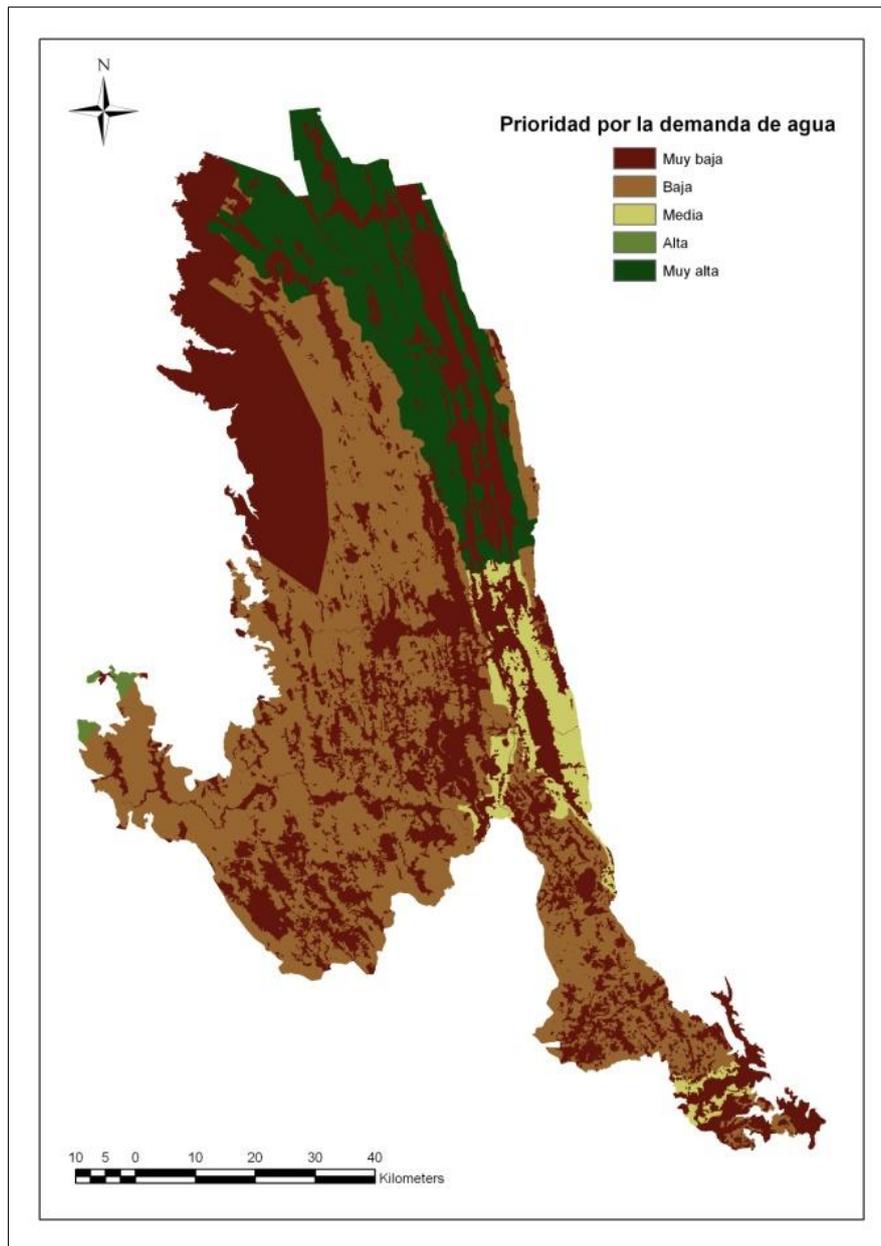


Figura 15. Mapa de áreas prioritarias por la demanda de agua.

Cuadro 31. Superficie priorizada para el PSA por la demanda de agua en la SMO.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Muy baja	313604.25	40.7
Baja	318645.50	41.4
Media	31380.81	4
Alta	2374.81	0.4
Muy alta	103446.44	13.4

Como se muestra en la Figura 15 y el Cuadro 31, las áreas de Muy alta prioridad para el PSA por la demanda de SE hidrológicos corresponden a los bosques que se localizan dentro de los límites de la subcuenca del río “El Salto” (Ce). Esto se debe a que es la subcuenca con mayor extracción de agua tanto para uso industrial como de servicios y también es la subcuenca conformando la SMO con mayor demanda de agua en general (dentro de los límites del estado de SLP).

Así mismo, en el mapa se muestra que las áreas de Alta prioridad se localizan dentro de los límites correspondientes al acuífero de Río Verde, el cual es el acuífero conformando la SMO con mayor extracción de agua.

4.1.5 Identificación espacial del riesgo y la amenaza relativa para los SE

El Mapa de áreas prioritarias por el riesgo de perder los SE (Figura 16), es el resultado de una combinación a través de la suma de pesos simple utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{Riesgo SE} = [(TP * 0.27) + (DP * 0.20) + (DP * 0.16) + (DC * 0.13) + (CUS * 0.14) + (PC * 0.10)]$$

Ecuación 13

Donde:

Riesgo SE= Peso del Mapa de áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE

TP= Peso del Mapa de riesgo de deforestación por el Tipo de propiedad

DP= Peso del Mapa de riesgo de deforestación por distancia a poblados

P = Peso del Mapa de riesgo de deforestación por la Pendiente

DC= Peso del Mapa de riesgo de deforestación por la Distancia a caminos y carreteras

CUS= Peso del Mapa de riesgo de deforestación por la Capacidad de uso del suelo

PC= Peso del Mapa de riesgo de deforestación por la Probabilidad de cambio de uso del suelo

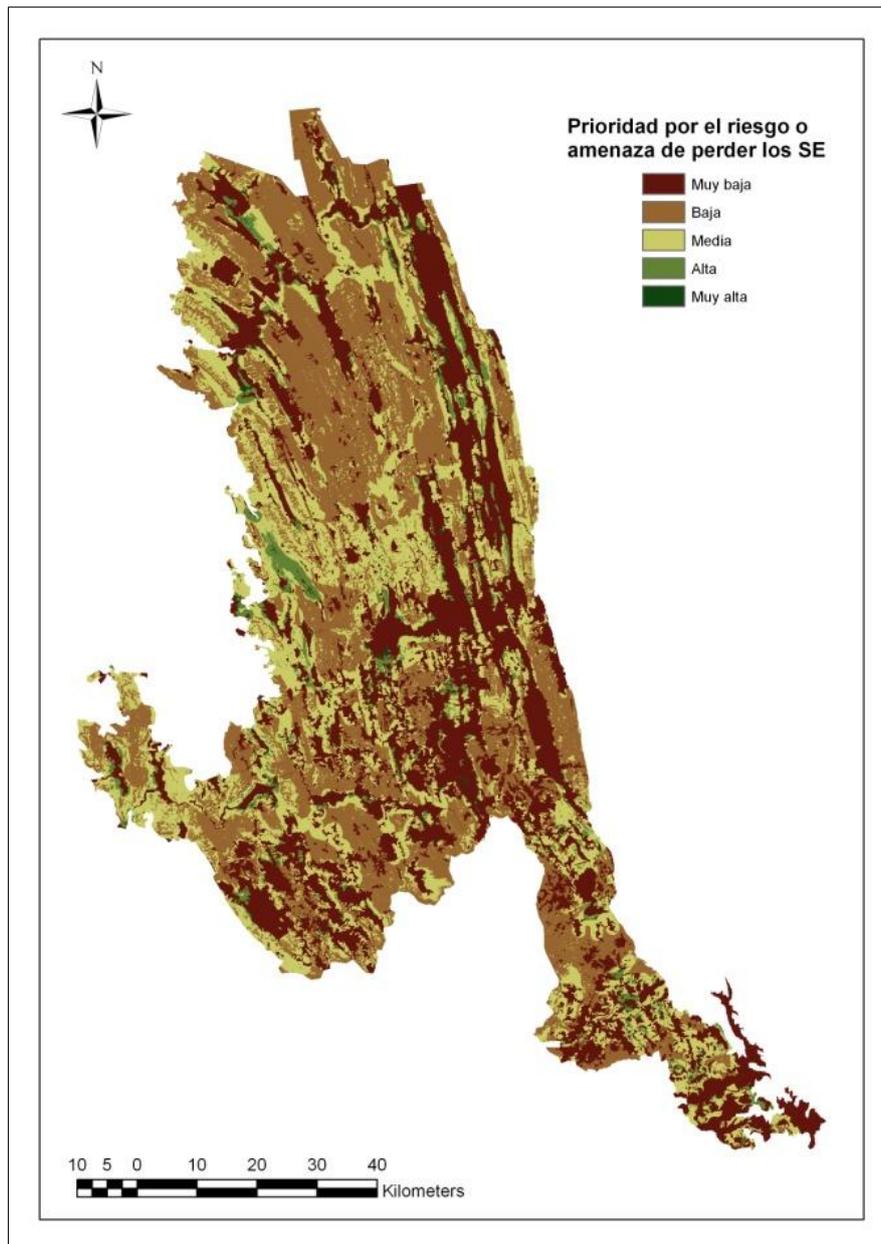


Figura 16. Mapa de áreas prioritarias por el riesgo de perder los SE.

Cuadro 32. Superficie priorizada para el PSA por el riesgo de perder los SE en la SMO.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Muy baja	242983.69	31.6
Baja	262999.13	34.1
Media	221008.75	29
Alta	35824.19	5
Muy alta	1230.88	0.2

Como se muestra en las Figura 16 y el Cuadro 32, las áreas de Muy alta y Alta prioridad para el PSA por el riesgo o amenaza de perder los SE, son superficies muy pequeñas localizadas puntualmente a lo largo de toda la SMO principalmente en los bosques más cercanos a poblados, caminos y carreteras.

4.1.6 Áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la Biodiversidad

En el presente estudio, la oferta y el riesgo tienen la misma importancia (mismo peso). Por lo tanto el Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad (Figura 17), es el resultado de una combinación a través de la suma de pesos simple utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{PSA biodiversidad} = [(\text{Oferta biodiversidad} * 0.50) + (\text{Riesgo SE} * 0.50)]$$

Ecuación 14

Donde:

PSA biodiversidad= Peso del Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad

Oferta biodiversidad= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad

Riesgo SE= Peso del Mapa de áreas prioritarias por el riesgo de perder los SE

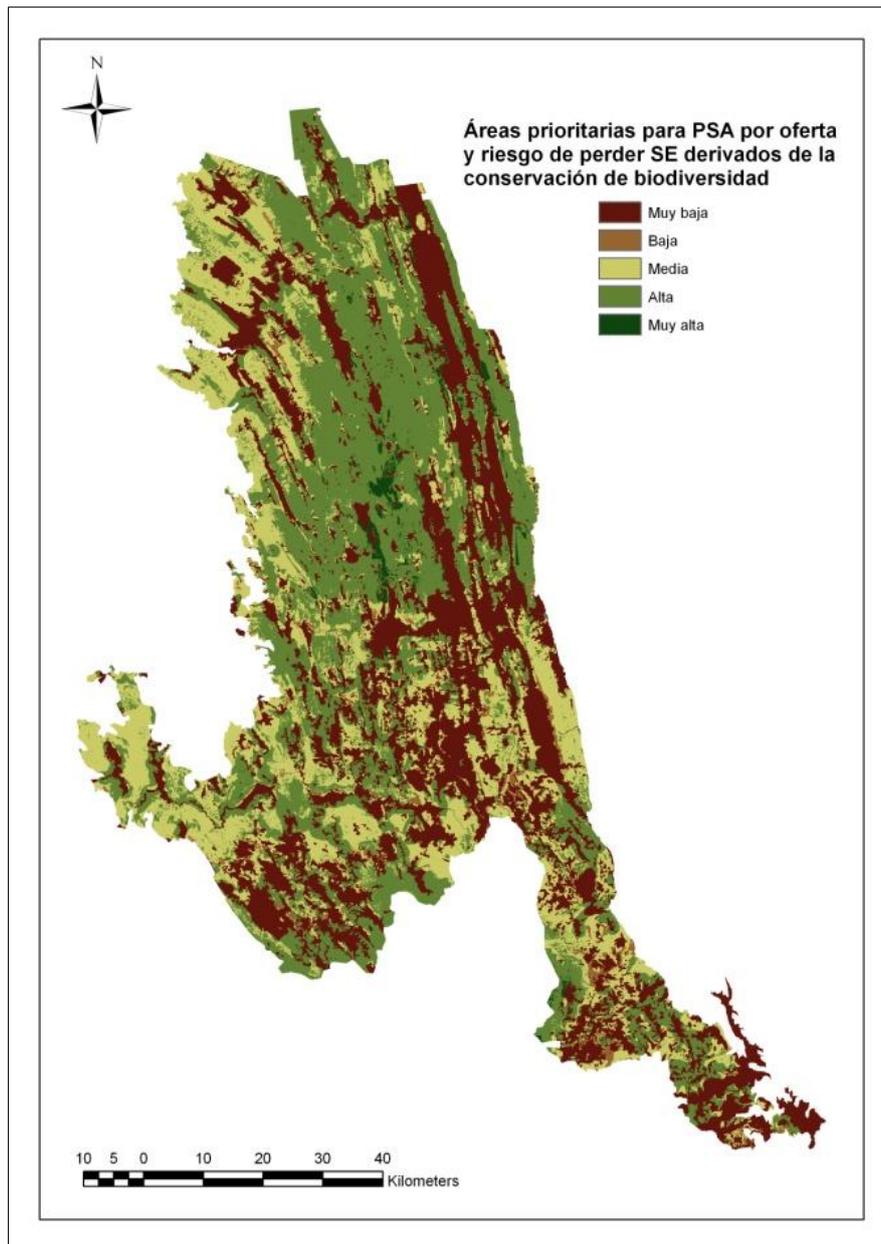


Figura 17. Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad.

Cuadro 33. Superficie priorizada para el PSA en la SMO por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Muy baja	242732.50	32
Baja	13865.00	2
Media	201710.50	26.2
Alta	295597.63	38.4
Muy alta	9173.19	1.2

Como se muestra en la Figura 17 y el Cuadro 33, las áreas de Muy alta prioridad para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad son superficies muy pequeñas localizadas al centro, noreste y sur de la SMO. Mientras que las áreas de Alta prioridad representan la mayor superficie y se localizan a lo largo de toda la SMO principalmente al norte de la misma

Es importante señalar que cuando se compara este output final con el output principal de Mapa de áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad, se distingue un aumento del 1.1% y 25.4% en la superficie de las áreas de Muy alta y Alta prioridad respectivamente.

4.1.7 Áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos

En el presente estudio, la oferta, demanda y el riesgo tienen la misma importancia (mismo peso). Por lo tanto el Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos (Figura 18), es el resultado de una combinación a través de la suma de pesos simple utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{PSA hidrológicos} = [(\text{Oferta agua} * 0.333) + (\text{Demanda agua} * 0.333) + (\text{Riesgo SE} * 0.333)]$$

Ecuación 15

Donde:

PSA hidrológicos= Peso del Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos

Oferta agua= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE hidrológicos

Demanda agua= Peso del Mapa de áreas prioritarias por la demanda de SE hidrológicos

Riesgo SE= Peso del Mapa de áreas prioritarias por el riesgo de perder los SE

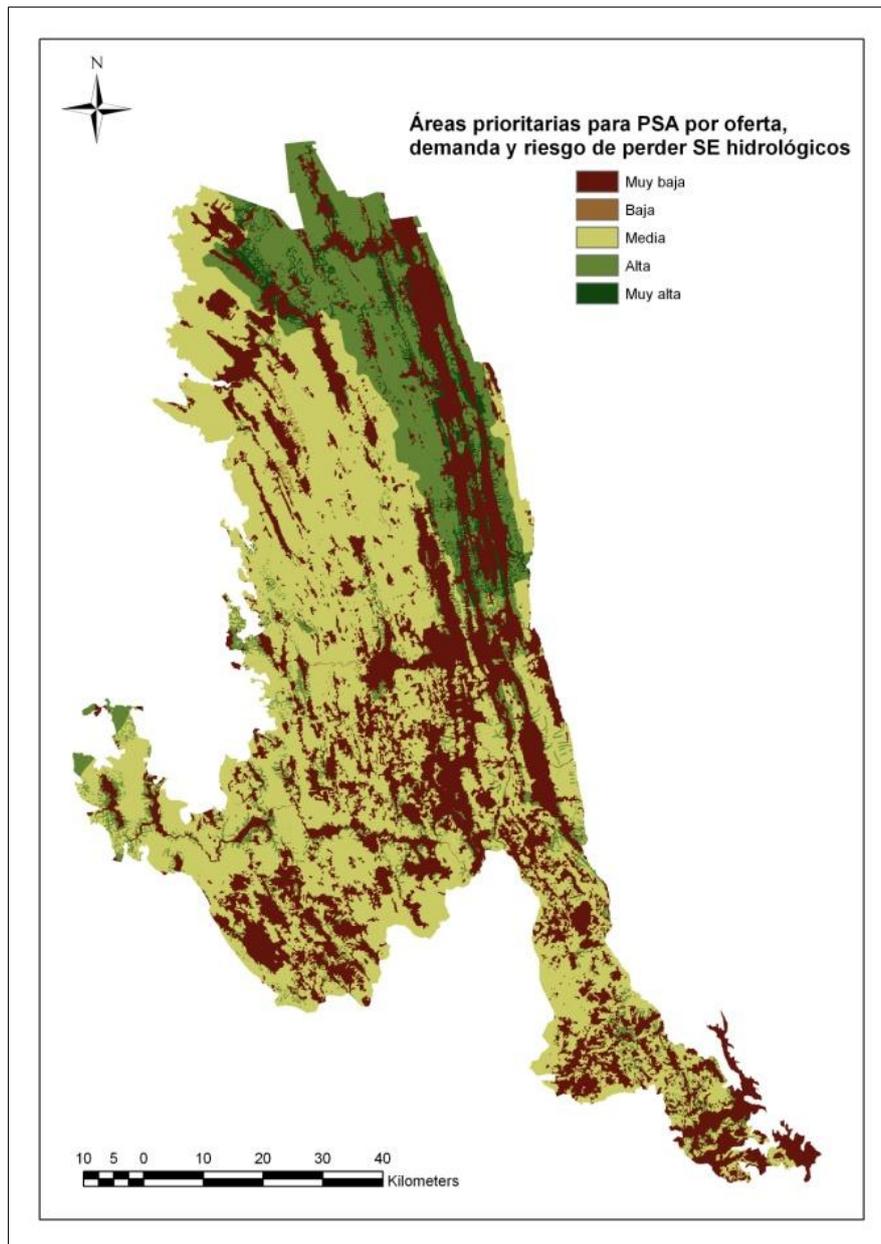


Figura 18. Mapa de áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE Hidrológicos.

Cuadro 34. Superficie priorizada para el PSA en la SMO por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Muy baja	242965.66	31.6
Baja	780.13	0.2
Media	380000.19	49.4
Alta	121195.50	16
Muy alta	19031.94	2.5

Como se muestra en la Figura 18 y el Cuadro 34, las áreas de Muy alta y Alta prioridad para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos, se concentran principalmente en las áreas correspondientes a la subcuenca del río “El Salto” y del acuífero Río Verde, respectivamente.

Es importante señalar que cuando se compara este output final con los outputs principales de Mapa de áreas prioritarias por la oferta de agua y el Mapa de áreas prioritarias por la demanda de agua, las prioridades para los SE hidrológicos cambian significativamente. Esto se ve reflejado en la superficie de Muy alta prioridad para la oferta de agua, la cual desciende en un 16.7% cuando se le adhieren los outputs de demanda y riesgo. Lo mismo sucede con las áreas de Alta prioridad por oferta de agua, las cuales disminuyen en un 32.3%. Y en el caso de la superficie de Muy alta y Alta prioridad por la demanda de agua, ésta disminuye en un 10.9% y aumenta en un 15.6% respectivamente, cuando se le adhieren los outputs de oferta y riesgo.

4.1.8 Áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE

Diversos autores (en Naidoo *et al.* 2008) recomiendan que para fines de conservación es de gran importancia identificar aquellas áreas donde exista congruencia espacial en la provisión de diversos SE. Con el fin de identificar dichas zonas, se elaboró un Mapa de áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE (Figura 19).

Este mapa fue obtenido utilizando la Ecuación 16 y en él se muestran las áreas de congruencia espacial y el nivel de importancia por la provisión relativa de ambos SE evaluados (hidrológicos y biodiversidad). Para fines prácticos, en este objetivo se realizó una reclasificación de los niveles de prioridad, agrupándose las categorías de Muy alta prioridad y Muy baja prioridad dentro de las categorías de Alta prioridad y Baja prioridad respectivamente.

$$\text{Provisión SE} = [(\text{Oferta biodiversidad}) + (\text{Oferta agua})]$$

Ecuación 16

Donde:

Provisión SE= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE

Oferta biodiversidad= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad

Oferta agua= Peso del Mapa de áreas prioritarias para la oferta de SE hidrológicos

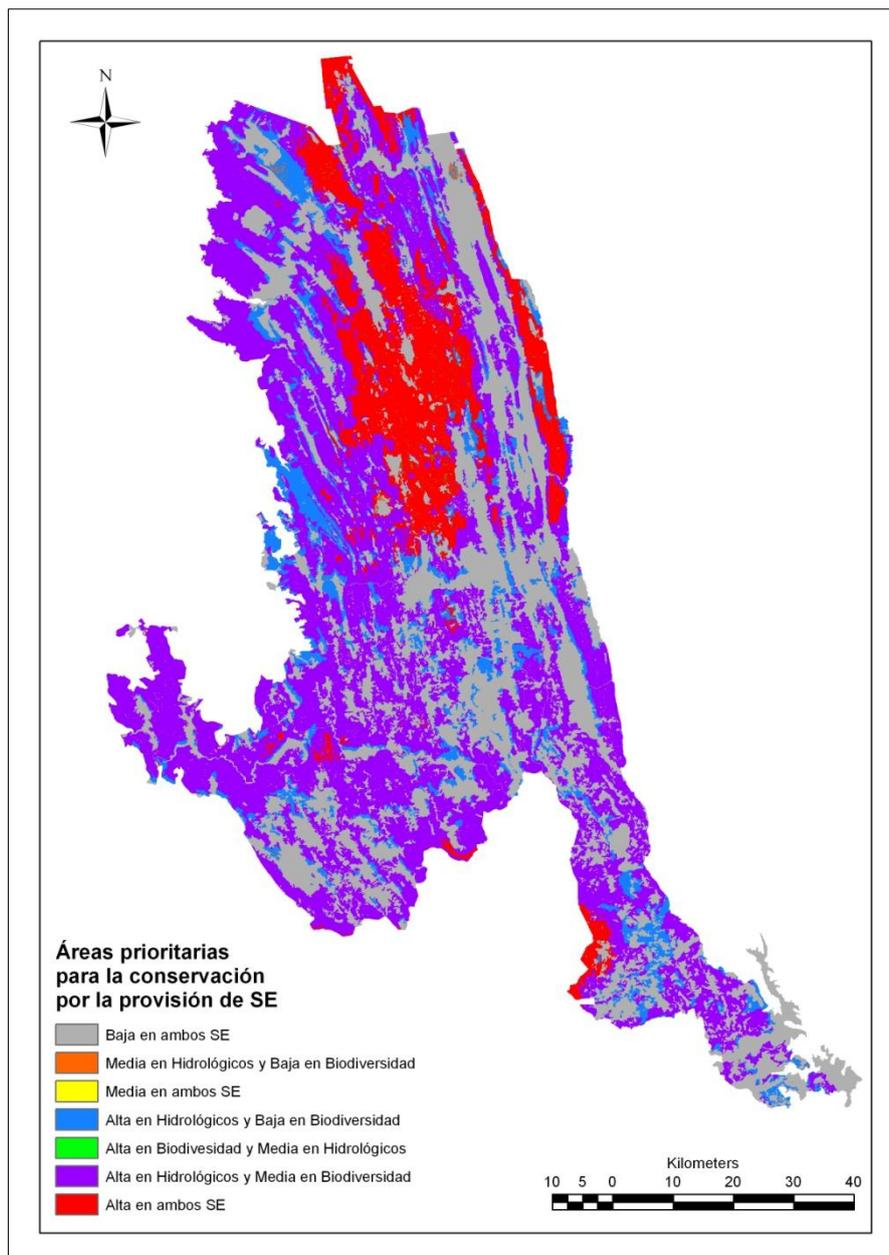


Figura 19. Mapa de áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE.

Cuadro 35. Superficie priorizada para la conservación por la provisión de SE hidrológicos y derivados de la biodiversidad, en la SMO.

Prioridad	Superficie (Ha)	%
Baja en ambos SE	243632.94	32
Media Hidrológicos y Baja Biodiversidad	1203.06	0.1
Media en ambos SE	2294	0.3
Alta Hidrológicos y Baja Biodiversidad	69967.31	9
Alta Biodiversidad y Media Hidrológicos	624.25	0.1
Alta Hidrológicos y Media Biodiversidad	351040.31	45.5
Alta en ambos SE	97259.13	13

Como se muestra en la Figura 19 y el Cuadro 35, las áreas de Alta prioridad para la conservación por la provisión de ambos SE se distribuyen principalmente al centro, norte, este y sur de la SMO, pero la mayor superficie se concentra al centro-norte de la misma. Así mismo, la mayor parte de la superficie en la SMO son áreas de Alta prioridad por la provisión de SE hidrológicos y se distribuyen a lo largo de toda la región; mientras que las áreas de Alta prioridad únicamente por la provisión de SE derivados de la Biodiversidad son muy poco representativas y se localizan de manera puntual en pequeñas superficies al centro, norte, este y sur de la SMO.

4.2 Resultados: Análisis de correlación y sensibilidad

4.2.1 Correlación espacial entre indicadores

En el caso de los indicadores utilizados en cada criterio para identificar las áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad, estos presentan en general una correlación espacial media a baja ($r \leq 0.61$) (Cuadro 36).

Cuadro 36. Correlación (r) espacial entre indicadores del “output” Mapa de Áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.

OFERTA BIODIVERSIDAD									
	Importancia Conservación de ecosistemas				Calidad paisaje		Calidad parche		
	PSN	PSR	RESINAP	VEREE	DC	Frag	CP	FP	TP
PSN									
PSR	0.56								
RESINAP	0.28	0.61							
VEREE	0.56	0.36	0.42						
DC	0.1	0.04	0.19	0.36					
Frag	0.2	-0.03	0.11	0.53	0.5				
CP	-0.05	-0.07	0.02	0.12	0.11	0.25			
FP	0.05	0.15	0.05	-0.16	-0.14	-0.27	-0.49		
TP	0.03	-0.05	-0.02	0.15	0.15	0.29	0.41	-0.64	

* VEREE: Mapa de Valor de los ecosistemas por su riqueza y endemismo de especies, PSR: Mapa de Pérdida de superficie a nivel regional, PSN: Mapa de Pérdida de superficie a nivel nacional, RESINAP: Mapa de Representación de los ecosistemas dentro del SINAP y su estado de conservación actual, Frag: Mapa de Fragmentación, DC: Mapa de Densidad de caminos y carreteras, TP: Mapa de Tamaño del parche, FP: Mapa de Forma del parche, CP: Mapa de Conectividad del parche.

Los resultados de correlación entre los indicadores establecidos en el criterio para identificar espacialmente áreas prioritarias por la demanda de agua, la mayoría presentó una correlación muy baja ($r \leq 0.21$). La excepción se dio entre los indicadores “Subcuenca con mayor demanda de agua” y “Uso de agua superficial para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos y su aprox. de contribución anual para el PSA”, donde se encontró una correlación muy alta ($r = 0.99$) (Cuadro 37).

Cuadro 37. Correlación (r) espacial entre indicadores del “output” Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua.

DEMANDA AGUA					
	UAUMPCsub	UAUMPCsup	Dasub	Dasup	IZD
UAUMPCsub					
UAUMPCsup	0.21				
Dasub	-0.2	-0.04			
DAsup	0.2	0.99	-0.02		
IZD	-0.3	-0.43	-0.18	-0.39	

* UAUMPCsub: Mapa de Uso de agua subterránea para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos y su aprox. de contribución anual para el PSA, UAUMPCsup: Mapa de Uso de agua superficial para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos y su aprox. de contribución anual para el PSA, IZD: Mapa de Tarifa de impuestos por zona de disponibilidad establecida en la LFD, DAsub: Mapa de Acuífero con mayor demanda de agua, DAsup: Mapa de Subcuenca con mayor demanda de agua.

Se obtuvo también la correlación entre los indicadores establecidos para identificar espacialmente áreas prioritarias para la oferta de agua, y los indicadores para identificar áreas prioritarias por la demanda de agua. Los resultados muestran que el indicador “Disponibilidad de agua subterránea” presenta una correlación muy alta ($r=0.96$) con el indicador “Acuífero con mayor demanda de agua” (Cuadro 38).

Cuadro 38. Correlación (r) espacial entre indicadores de los “outputs” Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua y Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua.

OFERTA & DEMANDA AGUA	
	DISPAsub
UAUMPCsub	-0.14
UAUMPCsup	-0.03
Dasub	0.96
DAsup	-0.02
IZD	0.13

DISPAsub: Mapa de Disponibilidad de agua subterránea, UAUMPCsub: Mapa de Uso de agua subterránea para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos y su aprox. de contribución anual para el PSA, UAUMPCsup: Mapa de Uso de agua superficial para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos y su aprox. de contribución anual para el PSA, IZD: Mapa de Tarifa de impuestos por zona de disponibilidad establecida en la LFD, DAsub: Mapa de Acuífero con mayor demanda de agua, DAsup: Mapa de Subcuenca con mayor demanda de agua.

En el caso de los indicadores establecidos para identificar áreas prioritarias por el riesgo de perder los SE, estos presentaron una correlación muy baja entre sí ($r=0.07$) (Cuadro 39).

Cuadro 39. Correlación (r) espacial entre indicadores del “output” Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE.

RIESGO DE PERDER SE		
Distancia a poblados		
	Cercanía P	Densidad P
Cercanía P		
Densidad P	0.07	

* Cercanía P: Mapa de bosque a menos de 1 km de poblaciones, Densidad P: Mapa de riesgo de deforestación por la densidad poblacional).

4.2.2 Correlación espacial entre criterios

La correlación espacial entre los criterios para identificar áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad es en general baja ($r<0.44$), a excepción de los criterios “Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO” y “Calidad del parche”, los cuales presentaron una correlación media ($r=0.74$) (Cuadro 40).

Cuadro 40. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad.

OFERTA BIODIVERSIDAD					
	PAR	CT	ICE	EC	PAI
PAR					
CT	0.31				
ICE	0.74	0.3			
EC	0.27	0	0.28		
PAI	0.5	0.16	0.44	0.43	

* ICE: Mapa de Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO, EC: Mapa de Distribución de especies importantes para la conservación, PAI: Mapa de Calidad del paisaje, PAR: Mapa de Calidad del parche, CT: Mapa de Complejidad del terreno.

Con respecto a la correlación espacial entre los criterios para identificar áreas prioritarias para implementar SAF, estos en general presentaron una correlación baja ($r < 0.26$), a excepción de los criterios “Disminuir efecto de borde en parches de ecosistemas naturales” e “Importancia para la restauración de los ecosistemas en la SMO”, los cuales presentaron una correlación media ($r = 0.69$) (Cuadro 41).

Cuadro 41. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias para implementar SAF.

IMPLEMENTAR SAF				
	CU	DEB	RC	IRE
CU				
DEB	0.26			
RC	0.02	0.05		
IRE	0.2	0.69	0.02	

* CU: Mapa de Conflicto en el uso del suelo, DEB: Mapa de Disminuir efecto de borde en parches de ecosistemas naturales, RC: Peso del Mapa de Restablecer la conectividad entre parches de ecosistemas naturales al menor costo, IRE: Peso del Mapa de Importancia para la restauración de los ecosistemas en la SMO.

Así mismo, la correlación espacial entre los criterios para identificar áreas prioritarias para la oferta de agua, en general resultó ser muy baja ($r < 0.10$) (Anexo 47; Cuadro 42).

Cuadro 42. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua.

OFERTA AGUA				
	RSCA	DISPA	RE	USC
RSCA				
DISPA	0.03			
RE	0	-0.01		
USC	0.1	0.04	-0.18	

* RE: Mapa de Riesgo natural de erosión, USC: Mapa de Usos del suelo y su aporte a la calidad del agua, RSCA: Mapa de Regulación de sedimentos sobre cuerpos de agua a través de la conservación de vegetación forestal en sus alrededores, DISPA: Mapa de Disponibilidad de agua.

De igual forma, la correlación espacial entre los criterios establecidos para identificar áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE resultó ser en general baja ($r < 0.38$) (Cuadro 43).

Cuadro 43. Correlación (r) espacial entre criterios del “output” Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE.

RIESGO DE PERDER SE						
	DC	CUS	DP	P	PC	TP
DC						
CUS	-0.01					
DP	0.15	0.04				
PC	-0.1	0.38	0			
PC	0.09	-0.05	0.01	0		
TP	0.01	-0.09	-0.01	-0.08	0	

* TP: Mapa de riesgo de deforestación por el Tipo de propiedad, DP: Mapa de riesgo de deforestación por distancia a poblados, P: Mapa de riesgo de deforestación por la Pendiente, DC: Mapa de riesgo de deforestación por la Distancia a caminos y carreteras, CUS: Mapa de riesgo de deforestación por la Capacidad de uso del suelo, PC: Mapa de riesgo de deforestación por la Probabilidad de cambio de uso del suelo).

4.2.3 Correlación espacial entre “outputs”

Con el fin de conocer la similitud espacial de la provisión relativa de servicios ambientales en la SMO, se realizó una correlación espacial entre los “outputs principales” y los “outputs finales”, los cuales en el presente estudio corresponden a:

- 1) Mapa de Áreas prioritarias por la provisión de SE derivados de la conservación de la biodiversidad;
- 2) Mapa de Áreas prioritarias para implementar SAF;
- 3) Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua;
- 4) Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua;
- 5) Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE;
- 6) Mapa de Áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE;
- 7) Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad;
- 8) Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos (Cuadro 44).

Los resultados de correlación entre outputs principales indican que éstos en general presentan una correlación baja ($r \leq 0.48$), con excepción de los outputs: Mapa de Áreas prioritarias por la provisión de SE derivados de la conservación de la biodiversidad, el cual esta medianamente correlacionado ($r = 0.66$) con el Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua; y el Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua, que esta medianamente correlacionado ($r = 0.66$) con el Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE.

Los resultados de correlación entre outputs finales indican que el Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad, esta medianamente correlacionado ($r = 0.79$) con el output final Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos. Así mismo, ambos mapas están altamente correlacionados ($r = 0.97$ y 0.93 respectivamente) con el Mapa de Áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE.

Cuadro 44. Correlación (r) espacial entre outputs.

OUTPUTS PRINCIPALES				
	OFERTA BIODIVERSIDAD	OFERTA AGUA	DEMANDA AGUA	RIESGO SE
OFERTA BIODIVERSIDAD				
OFERTA AGUA	0.66			
DEMANDA AGUA	0.48	0.5		
RIESGO SE	0.36	0.66	0.36	
OUTPUTS FINALES				
	PSA BIODIVERSIDAD	PSA HIDROLÓGICOS	PSA PROVISIÓN SE	
PSA BIODIVERSIDAD				
PSA HIDROLÓGICOS	0.79			
PSA PROVISIÓN SE	0.97	0.93		

* OFERTA BIODIVERSIDAD: Mapa de Áreas prioritarias por la oferta de SE derivados de la conservación de la biodiversidad, OFERTA AGUA: Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua, DEMANDA AGUA: Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua, RIESGO SE: Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE, PSA BIODIVERSIDAD: Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad, PSA HIDROLÓGICOS: Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos, PSA PROVISIÓN SE: Mapa de Áreas prioritarias para la conservación por la provisión de SE).

4.2.4 Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad consistieron en comparar los resultados de cada uno de los “outputs principales” con el peso asignado por los expertos y los “outputs principales” con pesos iguales. Esto se hizo con la finalidad de corroborar si existe diferencia en la superficie priorizada para el PSA en la SMO cuando se toma en cuenta la opinión de los expertos. Los resultados se detallan a continuación.

En el caso del Mapa de Áreas prioritarias por la provisión de SE derivados de la conservación de la biodiversidad, los resultados muestran una marcada diferencia en la superficie priorizada para el PSA entre ambos outputs (con peso de los expertos y con pesos iguales). La diferencia de superficie entre ambos outputs es del 5.1% para las áreas de Muy alta prioridad, 18.3% para áreas de Alta prioridad, 21.7% en las áreas de prioridad Media, 0.2% en las áreas de Baja prioridad y de 1.7% en áreas de Muy baja prioridad (Figura 20).

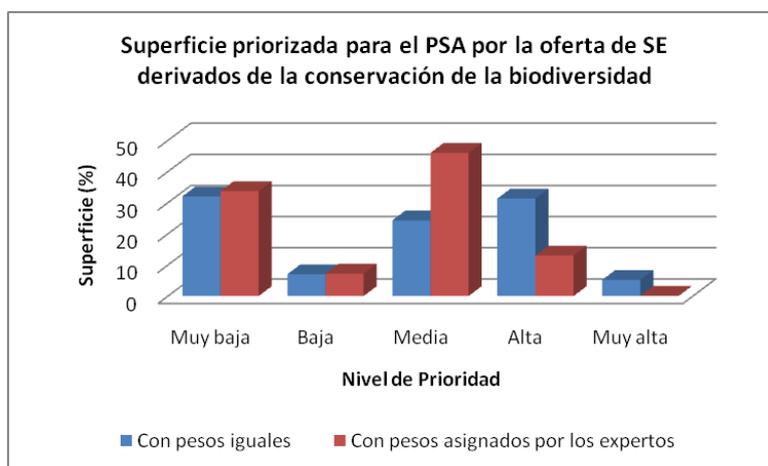


Figura 20. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias por la provisión de SE derivados de la conservación de la biodiversidad” con pesos iguales y con el peso asignado por los expertos.

En el caso del Mapa de Áreas prioritarias para implementar SAF, los resultados muestran que la diferencia en la superficie priorizada entre ambos outputs es poco significativa siendo que: no se encontró diferencia (0%) para las áreas de Muy alta prioridad; para áreas de Alta prioridad se obtuvo una diferencia del 0.4%; en las áreas

de prioridad Media fue de 1.2%; las áreas de Baja prioridad difieren solo en un 0.9% y en áreas de Muy baja prioridad la diferencia fue de 0.2% (Figura 21).

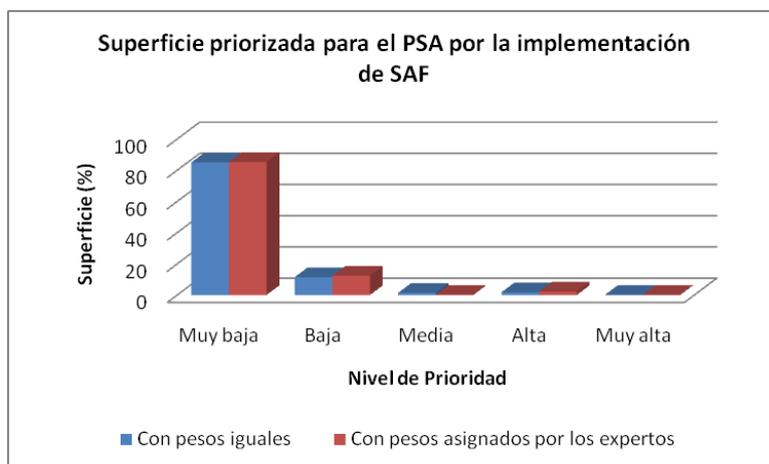


Figura 21. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias para implementar SAF” con pesos iguales y con el peso asignado por los expertos.

En el caso del Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua, los resultados muestran una marcada diferencia en la superficie priorizada entre ambos outputs, siendo esta del 0.5 % para las áreas de Muy alta prioridad, 16.7% para áreas de Alta prioridad, 17.3% en las áreas de prioridad Media, 0.1% en las áreas de Baja prioridad y de 1.7% en áreas de Muy baja prioridad (Figura 22).

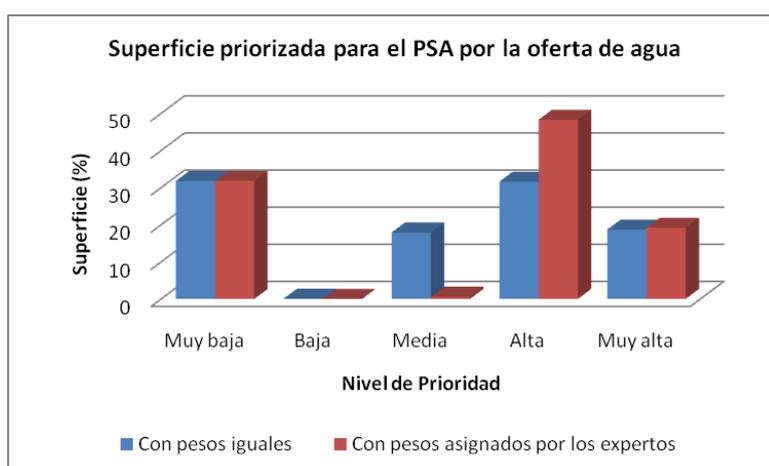


Figura 22. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias para la oferta de agua” con pesos iguales y con el peso asignado por los expertos.

En el caso del Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua, los resultados entre ambos outputs muestran que no existe diferencia entre las áreas de Muy alta prioridad siendo ésta del 0%, pero en la superficie priorizada para los otros niveles se encontró una diferencia del 4.6% en áreas de Alta prioridad, 32.3% en áreas de prioridad Media, en las áreas de Baja prioridad la diferencia fue de 27.9 y en áreas de Muy baja prioridad fue del 9% (Figura 23).

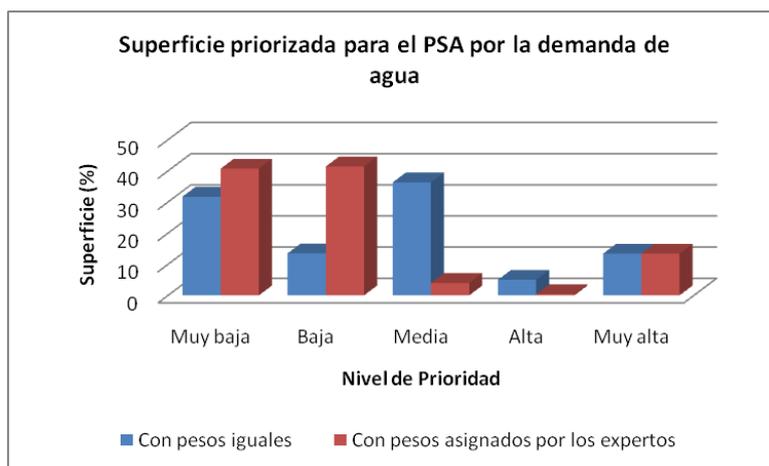


Figura 23. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias por la demanda de agua” con pesos iguales y con el peso asignado por los expertos.

Así mismo, en el caso del Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE, los resultados entre ambos outputs muestran que no existe diferencia entre las áreas de Muy alta prioridad siendo ésta del 0%. Sin embargo se encontró una marcada diferencia en la superficie priorizada para los otros niveles, siendo esta del 2% en áreas de Alta prioridad, 11% en áreas de prioridad Media, en las áreas de Baja prioridad la diferencia fue de 11.5 y en áreas de Muy baja prioridad fue del 1.4% (Figura 24).

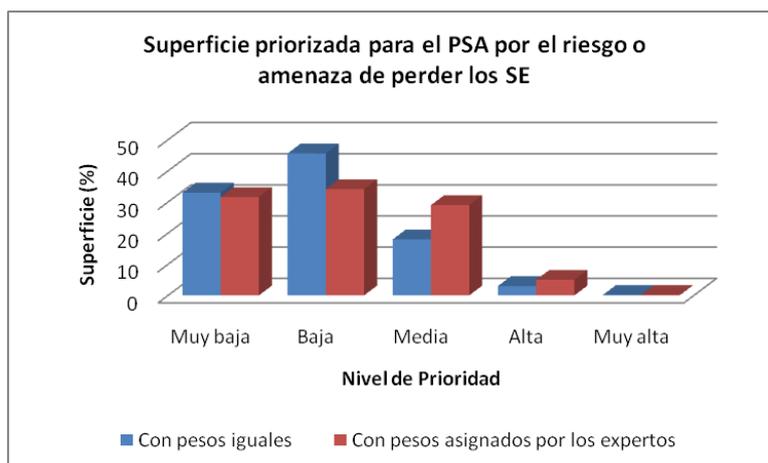


Figura 24. Análisis de sensibilidad entre los outputs principales “Mapa de Áreas prioritarias por el riesgo o amenaza de perder los SE” con pesos iguales y con el peso asignado por los expertos.

4.3 Discusión de los resultados

4.3.1 Áreas priorizadas para el PSA en la SMO

Los outputs principales y finales de las áreas prioritarias para el PSA en la SMO muestran de manera general que en la zona de estudio existen áreas muy importantes para la conservación de los SE hidrológicos y los derivados de la biodiversidad. Los resultados más sobresalientes de estos outputs se discuten a continuación.

La SMO es muy importante por la provisión de SE derivados de la biodiversidad ya que el 13.1% de su superficie (97,890 ha) son áreas de Alta a Muy alta prioridad en la provisión de dichos servicios (Figura 12, Cuadro 28).

Así mismo, la SMO es muy importante por la provisión y demanda de SE hidrológicos ya que el 67.5% de su superficie (520,298 ha) son áreas de Alta a Muy alta prioridad para la oferta de agua; mientras que el 13.8% (105,821 ha) son áreas de Alta a Muy alta prioridad por la demanda de agua (Figuras 14 y 15, Cuadros 30 y 31).

Por otro lado, el 14.9% (113,254 ha) de la superficie con uso agropecuario en la SMO, presenta áreas donde la implementación de SAF a un bajo costo, tendría un efecto positivo en el mejoramiento de la provisión de SE derivados de conservar la biodiversidad (Figura 13, Cuadro 29).

Con respecto a las áreas priorizadas para el PSA por el riesgo o amenaza de perder los SE, los resultados indican que aproximadamente el 5.2% (37,055.07 ha) de la superficie en la SMO presenta zonas con alto a muy alto riesgo de deforestación (Figura 16, Cuadro 32).

Si la finalidad de un eficiente PSA es identificar áreas donde la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE sea relevante: la SMO presenta 1.2% (9,173.19 ha) y 38.4% (295,597.63 ha) de su superficie con áreas de Muy alta y Alta prioridad respectivamente, por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad; mientras que aproximadamente 2.5% (19,031.94 ha) y 16% (121,195.50 ha) son áreas con Muy alta y Alta prioridad respectivamente, por la oferta, demanda y riesgo de perder los SE hidrológicos (Figuras 17 y 18, Cuadros 33 y 34).

Para fines de conservación, en general la SMO cuenta con una extensa superficie importante por la confluencia en la provisión de SE hidrológicos y los derivados de la biodiversidad, ya que aproximadamente el 13% de su superficie (97,259.13 ha) corresponde a áreas de Alta a Muy alta prioridad por la confluencia en la provisión de ambos servicios ecosistémicos (Figura 19, Cuadro 35).

4.3.2 Correlación espacial entre indicadores y entre criterios

En el presente estudio, se encontró en general una correlación media a baja entre los criterios e indicadores propuestos para cada objetivo, a excepción de algunos casos, los cuales se discuten a continuación.

- a) El caso de los indicadores “Subcuenca con mayor demanda de agua” y “Uso de agua superficial para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos y su aprox. de contribución anual para el PSA”, se encontró una correlación muy alta ($r= 0.99$) debido a que en la zona de estudio las áreas donde existe una mayor demanda de agua superficial son también las áreas donde existe una mayoría de usuarios mayoritarios (industrial y servicios) del agua y por lo tanto un mayor potencial de compra del servicio.

Esta alta correlación únicamente se da en el caso de agua superficial mas no aplica al caso de agua subterránea, por lo tanto, para efectos del presente estudio, se tomaron en cuenta ambos indicadores. Sin embargo se recomienda comparar si se correlacionan de la misma manera en otras regiones del país, de forma que se pueda tomar una decisión acerca de cuál de los dos indicadores podría estar siendo redundante.

- b) El indicador “Disponibilidad de agua subterránea” está altamente correlacionado ($r= 0.96$) con el indicador “Acuífero con mayor demanda de agua”. Esto se explica debido a que en el caso de la zona de estudio, las áreas con mayor extracción de agua subterránea (demanda) son las áreas donde los acuíferos se encuentran en estado crítico (con problemas de disponibilidad). Sin embargo para tomar una decisión acerca de cuál de los indicadores está siendo redundante, se tendría que comprobar su correlación en otras regiones del país.

4.3.3 Correlación espacial entre “outputs”

Los resultados de la correlación espacial entre “outputs principales” indican que en general la provisión relativa de los SE derivados de la conservación de la Biodiversidad y los SE hidrológicos, se encuentra distribuida de diferente forma en el paisaje pero también presenta áreas donde ambos SE confluyen espacialmente ($r=0.66$).

Lo mismo sucede entre los “outputs finales” Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad y el Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la oferta, demanda y el riesgo de perder los SE hidrológicos, los cuales presentan cierta similitud en su distribución espacial ($r=0.79$) y también son muy similares ($r= 0.97$ y 0.93 respectivamente) con el Mapa de Áreas prioritarias para el PSA por la provisión de SE.

4.3.4 Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad realizados en el presente estudio, muestran que en general existe una gran diferencia entre la superficie priorizada para el PSA en los output principales con el peso asignado por los expertos y la superficie priorizada para el PSA en los outputs principales con los pesos iguales.

Esto quiere decir que los cambios en el peso asignado a los criterios e indicadores afectan de manera significativa en la distribución de la superficie priorizada para el PSA y que la opinión de los expertos en la valoración de estos criterios tiene un efecto muy importante en la superficie elegida para el PSA.

4.3.5 Medición de los criterios utilizados en la identificación espacial de áreas prioritarias para el PSA

Existen algunos criterios cuya forma de medición va más allá de una escala regional. Un ejemplo de estos, son el criterio “Usos del suelo y su aporte a la calidad del agua” y los indicadores correspondientes a la demanda de agua.

En el caso de los indicadores correspondientes a la demanda de agua, se tiene que existen acuíferos y subcuencas cuya demanda dentro de los límites del estado no es alta, pero en los estados que comparten el agua de dichas cuencas y acuíferos, la demanda puede ser mucho mayor y este vacío de información está generando ruido en los resultados. Lo mismo ocurre con el criterio “Usos del suelo y su aporte a la calidad del agua”, ya que es medido a nivel de subcuenca y no se está tomando en cuenta los usos del suelo del territorio que complementa a dichas subcuencas más allá de los límites estatales.

En ambos casos, debido a ciertas limitantes en la obtención de información fuera de los límites estatales, en el presente estudio únicamente se midieron las variables correspondientes, en las subcuencas y acuíferos dentro del Estado de San Luis Potosí. Sin embargo para obtener un peso verdadero, estos deben ser medidos a nivel de cuenca y de

acuífero dentro de las delimitaciones espaciales que comparten con otros estados de la República Mexicana.

También es importante señalar que el criterio “Riesgo de erosión” en el presente estudio es considerado como una variable que influye en la calidad de agua debido al aporte de sedimentos, sin embargo en posteriores estudios también podría considerarse como un criterio en la identificación espacial del riesgo o amenaza de perder los SE.

Con respecto al indicador “Disponibilidad de agua superficial”, el cual es medido con base en la precipitación promedio anual, en el presente estudio fue eliminado del modelo para la identificación espacial de áreas prioritarias por la oferta de agua, debido a que no presentó diferencias en los pesos asignados por los expertos. Sin embargo en otras regiones del país y evaluado por otros expertos, podría tener un peso significativo y ser tomado en cuenta en la elaboración del modelo para dicho objetivo.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El método presentado en este estudio permite identificar a una escala regional y de forma más precisa, las áreas donde la provisión de SE es mayor y donde estos presentan una mayor demanda y un mayor riesgo de desaparecer.

Mediante esta metodología se identificaron las áreas de mayor prioridad para el PSA por la provisión, demanda y riesgo de perder los SE. Los resultados muestran que en general el 39.5% (304,770 ha) de superficie en la SMO son áreas de alta a muy alta prioridad por la oferta y el riesgo de perder los SE derivados de la conservación de la biodiversidad; mientras que aproximadamente el 18.5% (140,227 ha) de su superficie son áreas de alta a muy alta prioridad por la oferta, demanda y riesgo de perder los SE hidrológicos

Así mismo, utilizando ésta metodología se encontró que aproximadamente el 13% (97,259.13 ha) de la superficie correspondiente a la SMO presenta zonas de alta a muy alta prioridad por la confluencia en la provisión de SE hidrológicos y derivados de la conservación de la biodiversidad. Estas áreas de confluencia en la provisión de ambos SE, además de ser prioritarias para el PSA, también son muy importantes como reservas naturales y deberían estar dentro de alguna categoría de protección dentro del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP).

La metodología integra la información técnica disponible para la SMO en el estado de San Luis Potosí con la finalidad de ayudar a los tomadores de decisiones en la priorización de áreas para el PSA. Aunque el método se basa únicamente en datos técnicos, considera las opiniones de todas las partes interesadas, con el fin de tener los efectos deseados en los resultados y tiene la flexibilidad necesaria para adaptarse a cambios en las políticas institucionales y gubernamentales.

El método puede ser implementado por las delegaciones estatales de CONAFOR, con el fin de que la toma de decisiones sobre la elección de Áreas prioritarias para el PSA se realice de una forma descentralizada y que todos los dueños de predios localizados en áreas importantes para el PSA, tengan las mismas oportunidades de participar y ser elegidos. Aunque el mecanismo con el cual la

CONAFOR podría implementar esta metodología en la toma de decisiones, implicaría una modificación de sus procedimientos administrativos actuales.

Un aspecto importante es que mediante el uso de este método, se pueden identificar las áreas donde la demanda de agua tiene mayor peso, una variable necesaria para que los tomadores de decisiones gestionen el presupuesto que se deposita anualmente en el Fondo Nacional Forestal para el PSAH, de forma que éste sea destinado a las cuencas o acuíferos de donde proviene la mayor parte de los impuestos para dicho fin. Así mismo, la identificación espacial de la demanda de agua, establece la pauta para generar mecanismos que permitan establecer un mercado real entre los usuarios del agua y los proveedores del servicio.

Esta metodología es una herramienta útil dentro de un marco bio-físico, sin embargo existen otras variables sociales que se deben de considerar, tales como los problemas de tenencia de la tierra y el costo de oportunidad del cambio de uso del suelo; variables que pueden influir en la exclusión de áreas priorizadas mediante esta metodología. Así mismo, es importante señalar que las áreas priorizadas para el PSA pueden variar dependiendo de los servicios ecosistémicos que se estén evaluando.

En el presente estudio por motivos técnicos y de disponibilidad de información se consideró únicamente el riesgo de deforestación como el riesgo o amenaza de perder los SE. Sin embargo para tener un mayor efecto en la identificación de dichas áreas, se deben de considerar también los procesos de degradación de los ecosistemas, tales como la tala selectiva, la extracción de especies, plagas, cacería furtiva, etc, variables que indudablemente representan una amenaza a la provisión de SE.

A pesar de que México cuenta con información cartográfica disponible a escala 1:50,000, existen aún muchos vacíos de información en ciertas regiones del país. Estos vacíos en la información cartográfica disponible a dicha escala, dificulta la precisión en la identificación espacial de algunas variables cuando se requiere trabajar a una escala regional o local. Por esta razón, la información cartográfica utilizada en este estudio fue obtenida en su mayoría a una escala 1:50,000, salvo pocas excepciones donde solo se encontró información cartográfica a una escala 1:250,000.

La correlación espacial entre indicadores, criterios y outputs, permite simplificar el método al eliminar redundancias entre los mismos. Sin embargo es necesario hacer estudios similares en otras regiones del país, con el fin de validar dichas redundancias, así como la estandarización de los pesos asignados por los expertos a los indicadores y criterios utilizados en esta metodología.

Los valores continuos de los diferentes niveles de prioridad para el PSA obtenidos mediante este método, fueron clasificados en valores discretos con la finalidad de distinguir fácilmente la delimitación de las áreas correspondientes a cada nivel de prioridad. Sin embargo, la clasificación de los valores para cada uno de los diferentes niveles de prioridad puede ser modificada acorde a las preferencias de los tomadores de decisiones.

Genera controversia el hecho de saber qué tanto puede sesgarse la identificación espacial de áreas para el PSA cuando se toma en cuenta la opinión de los expertos en la valorización de los indicadores y criterios establecidos para cada uno de los objetivos en el presente estudio. Por lo que es importante dejar claro que el método utilizado en el presente estudio es flexible a este tipo de cambios y que corresponde a los tomadores de decisiones (dependiendo de sus intereses y prioridades) definir la forma en que se valorarán los indicadores y criterios establecidos en la identificación de áreas prioritarias para el PSA.

6 BIBLIOGRAFÍA

Adger N.; Brown K.; Cervigni R. y Moran D. 1995. Total Economic Value of Forest in México. Royal Swedish Academy of Sciences. *Ambio* 24(5): 286-296.

Angelsen A. y Kaimowitz D. 1999. Rethinking the causes of deforestation: Lessons from Economic Models. *The World Bank Research Observer* 14(1):73-98.

Aquino-Martínez G. s/f. Manual de Servicios Ambientales- Manual para la capacitación de participación comunitaria. Global Environmental Management Education Center (GEM). 12 p.

Astete, S.; Sollmann, R.; Silveira, L. 2008. Comparative Ecology of Jaguars in Brazil. *CAT News Special Issue - The Jaguar in Brazil* no.4, p.9-14

Athie-Lambarri M. 1987. Calidad y Cantidad del agua en México. Primera edición, Universo Veintiuno, México D.F. 152 p.

Beer, J; Harvey, CA; Ibrahim, M; Harmand, J.M; Somarriba, E.; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38), p.80-87.

Bennett A.F. 2004. Enlazando el paisaje: el papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre. UICN, San José Costa Rica. 278 p.

Bezaury-Creel, J. y Gutiérrez-Carbonell, D. 2009. Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México; Estado de conservación y tendencias de cambio. *Capital natural de México* (en línea). Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), México, v. II, p.385-431. Consultado 28 mar.2010. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalNatMex.html>

Binkley, D. y Brown, T.C. 1993. Forest practices as nonpoint sources of pollution in North America. *Water Resources Bulletin* no.29, p.729-740.

Bosch, J.M. y Hewlett, J.D. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration (en línea). *Journal of Hydrology* no.55, p.3-23. Consultado 24 ene.2010. Disponible en: <http://coweeta.uga.edu/publications/2117.pdf>

Brooks, T. M.; Mittermeier, R. A.; da Fonseca, G. A. B.; Rylands, A. B.; Konstant, W. R.; Flick, P.; Pilgrim, J.; Oldfield, S.; Magin, G.; Hilton, C. T. 2002. Habitat loss and extinction in the hotspots of biodiversity. *Conservation Biology* no.16, p.909-923

Calder, I.R. 2002. Forests and Hydrological Services: Reconciling public and science Perceptions (en línea). *Land Use and Water Resources Research* no.2, p. 2.1-2.12. Consultado 23 ene.2010. Disponible en: <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/47860/2/paper02-02.pdf>

Campos, J.J.; Alpízar, F.; Louman, B.; Parrotta, J. 2005. An Integrated Approach to Forest Ecosystem Services. Mery, G., Alfaro, R., Kanninen, M. and Lobovikov, M. (Eds.). 2005. *Forests in the Global Balance - Changing Paradigms*. IUFRO World Series v.17, Helsinki, p. 97-116.

Carlson, J.Y.; Andrus, C.W.; Froehlich, H.A. 1990. Woody debris, channel features, and macroinvertebrates of streams with logged and undisturbed riparian timber in northeastern Oregon, USA. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences no.47, p.1103–1111.

Ceballos, G. y Griselle, O. 2005. Los Mamíferos Silvestres de México. Conabio- Fondo de Cultura Económica, Mex. 986 p.

Colegio de Postgraduados. 2008. Evaluación Externa de los Apoyos de los Servicios Ambientales ejercicio fiscal 2007 (en línea). CONAFOR, Mex. 231p. Consultado 3 ene. 2010. Disponible en:
http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=20#divEvaluaciones5

Conabio(Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, Mx). 2000. Regiones Terrestres Prioritarias de México (en línea). Consultado 13 Feb. 2010. Disponible en:
<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tcentro.html>

CONAFOR .2010, Zonas Elegibles para PSA 2010 (en línea). Consultado el 10 ene. 2010. Disponible en:<http://www.cnf.gob.mx:81/emapas/> y
http://www.conafor.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=444&Itemid=49

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, Mx).s/f.Documento de Posición Institucional- PROÁRBOL-Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) y Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad y para fomentar el establecimiento y mejoramiento de Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA) (en línea). Gerencia de Servicios Ambientales del Bosque. 7 p. Consultado 5 ene.2010. Disponible en:
http://www.coneval.gob.mx/contenido/eval_mon/3533.pdf

CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, Mx). 2010a. Normateca- Decreto por el cual se crea la Comisión Nacional Forestal (en línea). Consultado 5 ene. 2010. Disponible en:
http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/normateca/Decreto_CONAFOR.pdf

_____. 2010b. Comisión Nacional Forestal: Servicios Ambientales en México (en línea). Consultado 7 ene. 2010. Disponible en:
http://www.conafor.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=360&Itemid=477

CONAFOR(Comisión Nacional Forestal, Mx);SEMARNAT(Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales).2009. Pago por servicios ambientales en ecosistemas forestales, criterios técnicos para la determinación de Zonas Elegibles. Presentación en Power Point. CONAFOR, San Luis Potosí, Mex. 37 diapositivas.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, Mx). 2007. Información de tarifas de agua potable. Organismo Operador de San Luis Potosí. Consultado 19 abr. 2010. Disponible en:
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SanLuisPotosi.pdf>

_____. 2008. Estadísticas del agua en México, primera edición (en línea). México, D.F. 230 p. Consultado 2 feb. 2010. Disponible en:
<http://www.conagua.gob.mx/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=1ec422d1-1265-4c24-9206b0267d1ec4e0|SISTEMA%20NACIONAL%20DE%20INFORMACIÓN%20DEL%20AGUA|10|0|0|0>

_____. 2009. Delimitación de acuíferos de la República Mexicana, siendo poligonales simplificadas basadas en límites estatales y municipales del Marco Geoestadístico Municipal 2000 y con base en cartas topográficas de INEGI escala 1:250,000. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México, D.F. Color.

_____. 2010a. Condiciones geohidrogeológicas en acuíferos y unidades hidrogeológicas del estado de San Luis Potosí, México. CONAGUA, Dirección local en San Luis Potosí, Subdirección de asistencia técnica- operativa. Solicitud de información personal. Hoja de Excel. 1p.

_____. 2010b. Concesiones de agua subterránea y superficial en el estado de San Luis Potosí- Localización geográfica, volumen de agua extraído y su uso. Dirección de administración del agua, Delegación San Luis Potosí. Ficha técnica.

Costanza, R.; d'Arge, R.; de Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.V.; Paruelo, J.; Raskin, R.G.; Sutton, P.; Van den Belt, M. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, no.387: 253–260.

COTAS (Comité técnico de Agua Subterránea, Mx). 2005. Estudio técnico del acuífero 2411: Estudio técnico de las condiciones geohidrológicas y sociales del Acuífero 2411 “San Luis”, en el estado de San Luis Potosí. p. 1-69

Crist, P. 2000. Gap Analysis. Version 2.1.0. Idaho Cooperative Fish and Wildlife Research Unit, EU (en línea). Consultado ene. 2010. Disponible en: https://courseware.education.psu.edu/courses/geog487/data/readings/Crist_and_Csuti_2000.pdf

Daily, G.C.; Alexander S.; Ehrlich P.R.; Goulder L.; Lubchenco J.; Matson P.A.; Mooney H.A.; Postel S.; Schneider S.H.; Tilman D.; Woodwell G.M. 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Ecological Society of America*, no.2. 16 p.

Daily, G.C. 2000. Management objectives for the protection of ecosystem services. *Environmental Science & Policy*, no.3: 333–339.

de Groot, R. 2006. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes (en línea). *Landscape and Urban Planning* no.75:175–186. Consultado ene. 2010. Disponible en: <http://www.uvm.edu/giee/publications/De%20Groot%20LUP-2006.pdf>

De HEK, S.; Kiersch, B.; Mañon, A. 2004. Aplicación de Pagos por Servicios Ambientales en Manejo de Cuencas Hidrográficas: lecciones de experiencias recientes en América Latina. Taller en Pago por Servicios Ambientales, Barcelona. Fuente Original: Pagiola S.; Bishop J. y Landell-Mills N. 2006. La venta de servicios ambientales forestales. Segunda Edición. SEMARNAT-INE. 463 p.

De Smith M.J; Googchild M.F; Longley P.A. 2007. *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools* (en línea). 2 ed. London, GB, s.e. p. 1-15. Consultado 10 feb.2010. Disponible en: http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=SULMdT8qPwEC&oi=fnd&pg=PT16&dq=Goodchild+2006&ots=fjzGdNuE4Z&sig=NucKuggqSH696PKFIFSjV05__D8#v=onepage&q=Goodchild%202006&f=false

Diario Oficial de la Federación. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Última reforma publicada DOF 16-05-2008 (en línea). Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión. 101 p. Consultado 10 ene. 2010. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf>

_____. 1992. Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada DOF 18-04-2008 (en línea). Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión. 102 p. Consultado 11 ene. 2010. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16.pdf>

_____. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2001: Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio; Lista de especies en riesgo. 153 p. Consultado ene. 2010. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Pages/inicio.aspx>

_____. 2003a. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Última reforma publicada DOF 26-12-2005 (en línea). Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión. 71 p. Consultado 8 ene. 2010. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/259.pdf>

_____. 2003b. Ley Federal de Derechos- Art. 223. Últimas Reformas DOF 27-11-2009 (en línea). Cámara de diputados del H. Congreso de la Unión. 470 p. Consultado ene. 2010. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/107.pdf>

_____. 2009. Reglas de Operación del Programa ProArbol 2010 (en línea). Comisión Nacional Forestal. 80 p. Consultado ene. 2010. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/proarbol/ReglasdeOperacion2010.pdf>

Diaz, S. and Duffy, J.E. 2006. Biodiversity and ecosystem services In: Encyclopedia of Earth (en línea). Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). Consultado 9 ago. 2009. Disponible en: http://www.eoearth.org/article/Biodiversity_and_ecosystem_services.

Escalante, T.; Rodríguez, G.; Morrone, J.J. 2005. Las provincias biogeográficas del componente mexicano de montaña desde la perspectiva de los mamíferos continentales (en línea). Revista Mexicana de Biodiversidad 2 (76):199-205. Consultado 25 ene. 2010. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/425/42576205.pdf>

Fahrig, L. 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 34: 487-515

FAO(Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1979. Provisional Methodology of Soil Degradation Assessment. FAO -UNEP -UNESCO, Roma, Italia. 84 p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2005. State of the World Forest 2005 (en línea). Food and Agriculture Organization. 181p. Consultado 18 ene. 2010. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/011/i0350e/i0350e00.htm>

Farber, S; Costanza, R; Wilson, M. 2002. Economic and ecological concepts for valuing Ecosystem services (en línea). Ecological Economics no.41: 375-392. Consultado 16 ene. 2010. Disponible en: [http://yosemite.epa.gov/SAB/sabcvpress.nsf/0/1c7c986c372fa8d485256e29004c7084/\\$FILE/Far_ber%20et%20al.pdf](http://yosemite.epa.gov/SAB/sabcvpress.nsf/0/1c7c986c372fa8d485256e29004c7084/$FILE/Far_ber%20et%20al.pdf)

- Ferrier, S. 2002. Mapping Spatial Pattern in Biodiversity for Regional Conservation Planning: Where to from Here? (en línea). *Sys. Biol.* 51(2):331-363. Consultado en enero de 2010. Disponible en: http://www.ecology.uq.edu.au/docs/SoC_Brazil_2005/Papers/Ferrier_2002_Part_1.pdf
- Flores-Rivas, J.; Mireles-Sánchez, R.; Flores-Cano, J.; González-Silva, B.; Chapa-Vargas L. 2008. Programa Estratégico Forestal del Estado de San Luis Potosí (PEFE-SLP) 2006-2025, Vol.1 y Vol.2 Gobierno del Estado de San Luis Potosí- SEDARH-CONAFOR-SEMARNAT-IPICYT. Disco compacto, 500 diapositivas.
- Flores-Villela y Gerez, 1994. Anfibios, reptiles, aves y mamíferos- Especies endémicas restringidas al tipo de vegetación. Fuente Original: SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca, Mx). 2000. Programa de Áreas Naturales Protegidas de México 1995-2000. 120 p.
- Gallardo, P. 2004. Huastecos de San Luis Potosí- Pueblos indígenas del México contemporáneo. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (en línea). Primera edición. México. 31 p. Consultado ene. 2010. Disponible en: http://www.cdi.gob.mx/index.php?option=com_docman&task=doc_details&Itemid=&gid=15
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Kopen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 2. ed. UNAM. México, DF. 246 p.
- Geist, H.J. and Lambin, E.F. 2002. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience* 52 (2): 143-150
- Gobierno del Estado, 2009. Áreas Prioritarias para el Manejo y Conservación en el Estado de San Luis Potosí, México. Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos (SEDARH), San Luis Potosí, Mex. 152 p.
- Goodchild, M.F. 1986. Spatial Autocorrelation. *Catmog* 47, Geo Books, Norwich. En: ArcInfo 9.0, commando "Help".
- Greenberg, J.D; Logsdon, M.G; Franklin, J.F. 2002. Introduction to Geographic Information Systems (GIS). En: Gergel, S.E; Turner, M.G eds. *Learning Landscape Ecology: A Practical Guide to Concepts and Techniques*. New York, US, Springer-Verlag. p. 17-30
- Griffith, J. 2002. Geographic techniques and recent applications of remote sensing to landscape-water quality studies. *Water, Air, and Soil Pollution* 138:181-19
- Guitouni, A. and Martel, J.M. 1997. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research* no.109: 501-521
- Guo, Z; Xiao, X; Li, D. 2000. An assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production (en línea). *Ecological Applications* 10 (3):925-936. Consultado 12 feb. 2010. Disponible en: http://www.biol.wvu.edu/hooper/Guoetal2000EcolAppl_waterflowecosystemservice.pdf
- Harrison, J. 1998. Key Water Quality Monitoring Questions: Designing Monitoring and Assessment Systems to Meet Multiple Objectives. Proceedings of the NWQMC National Monitoring Conference (en línea). Consultado 10 feb. 2010. Disponible en: <http://www.nwqmc.org/98proceedings/Papers/17-HARR.html>

Hartshorn, G., Ferraro, F., Spengel, B., 2005. Evaluation of the World Bank — GEF Ecomarkets Project in Costa Rica. Worldbank, Washington DC.

Harvey, C.A. y Saénz, J.C. 2008. Evaluación y conservación de biodiversidad en paisajes fragmentados de Mesoamérica. 1er edición. Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio). Santo Domingo de Heredia, C.R. 620 p.

Haupt, H.F., Kidd, W.J., 1965. Good logging practices reduce sedimentation in central Idaho. *Journal of Forestry* 63, 664–670.

Honnay, O; Piessens, K; Landuyt, W; Hermy, M; Gulinck, H. 2002. Satellite based land use and landscape complexity indices as predictors for regional plant species diversity (en línea). *Landscape and Urban Planning* 63:241-250. Consultado 20 ene. 2010. Disponible en: http://bio.kuleuven.be/pcb/Honnay_LUP.pdf

Imbach, P. 2005. Priority areas for payment for environmental services (PES) in Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. 99 p.

INE (Instituto Nacional de Ecología). 2007. Problemas de calidad del agua en México (en línea). Consultado 10 feb. 2010. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/estudios/397/castillo.html>

_____. 2009. Estudio socioeconómico de las causas de deforestación en México (en línea). 40 p. Consultado en Febrero de 2010. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/descargas/dgipea/deforestacion.pdf>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1984. Cartas de uso potencial: Agricultura (F-14-5 y F-14-8); Ganadería (F-14-5 y F-14-8); Forestería (F-14-5 y F-14-8). Esc. 1:250,000. Color.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2001. Carta estatal de hidrología superficial (San Luis Potosí). Esc. 1:250,000. Color

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2002. Cartas topográficas: F14A66; F14A67; F14A68; F14A69; F14A76; F14A77; F14A78; F14A79; F14A86; F14A87; F14A88; F14A89; F14B81; F14C16; F14C17; F14C18; F14C19; F14D11; F14C27; F14C28; F14C29; F14D21; F14D22; F14C37; F14C38; F14C39; F14D31; F14D32; F14D41. Esc. 1:50,000. Color.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2003. Síntesis de Información Geográfica del Estado de San Luis Potosí. Desglose geográfico estatal. ISBN: 970-13-4321-2. CD.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2005. Mapa uso de suelo y vegetación de México. Esc. 1:1000000. Color

Joering, F.; Theriault, M; Musy, A. 2001. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *Geographical information science* 15 (2):153- 174

Jose, S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforest Syst* 76:1–10

Kaimowitz, D. 2001. Cuatro medio verdades: la relación bosques y agua en Centroamérica (Foro). *Revista Forestal Centroamericana*: 6-10.

Klingebiel, A. A. y Montgomery, P. H. 1961. *Land capability classification*. USDA. Washington DC. 210 p.

Lambin, E.F; Turner, B.L.; Geist, H.J.; Agbola, S.B.; Angelsen, A.; Bruce, J.W; Coomes, O.T.; Dirzo, R.; Fischer, G.; Folke, C.; P.S. George; Homewood, K.; Imbernon, J.; Leemans, R.; Xiubin Li; Moran, E.; Mortimore, M.; P.S. Ramakrishnan; Richards, J.F.; Skanes, H.; Steffen, W.; Stone, G.D.; Svedin, U.; Veldkamp, T.A.; Vogel, C.; JianchuXu. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11(4): 261-269.

Landell-Mills, N. and Porras, T. I. 2002. "Silver bullet or fools' gold? A global review of markets for forest environmental services and their impact on the poor". *Instruments for sustainable private sector forestry series*. International Institute for Environment and Development, London. 237 p.

Langhammer, P.F.; Bakarr, M.I.; Bennun, L.A.; Brooks, T.M.; Clay, R.P.; Darwall, W.; De Silva, N.; Edgar, G.J.; Eken, G.; Fishpool, L.D.C.; Fonseca, G.A.B.; da Foster, M.N.; Knox, D.H.; Matiku, P.; Radford, E.A.; Rodrigues, A.S.L.; Salaman, P.; Sechrest, W.; and Tordoff, A.W. 2007. *Identification and Gap Analysis of Key Biodiversity Areas: Targets for Comprehensive Protected Area Systems*. Gland, Switzerland. IUCN. 134 p.

Laurance, W.F.; Lovejoy, T.E.; Vasconcelos, H.L.; Bruna, E.M; Didham R.K.; Stouffer, P.C.; Gascon, C.; Bierregaard, R.O.; Laurance, S.G.; Sampaio, E. 2002. Ecosystem Decay of Amazonian Forest Fragments: a 22-Year Investigation. *Conservation Biology* 16(3). Pp: 605-618.

Leclerc, G; Rodríguez, J. 1996. Using a GIS to determine Critical Areas in the Central Cordillera Conservation Area, Costa Rica. en: *Conservation Policy Making Using Digital Mapping Technologies: Case studies in Costa Rica*. Savitsky, B. G. And Lacher, T. E. Jr. (editors). Columbia University Press, *Biology and Resource Management in Tropics Series*.

Limburg, K; O'Neill, R; Costanza, R; Farber, S. 2002. Complex systems and valuation. *Ecological Economics* no.41: 409-420.

Luna, I.; Morrone, J. J.; Espinosa, D. 2004. *Biodiversidad de la Sierra Madre Oriental*. CONABIO-UNAM., México. 527 p.

Malczewski, J. 1999. *GIS and Multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons, New York. 392 p.

Mansir Aminu. 2007. *A geographic Information System (GIS) and Multi-Criteria Analysis for sustainable tourism planning*. Tesis Mag. Sc. Faculty of built environment, Universiti Teknologi Malaysia. 166 p.

Manson, R. 2004. Los Servicios hidrológicos y la Conservación de los bosques en México. *Madera y Bosques* 10 (1):3-20. Consultado 6 feb. 2010. Disponible en: <http://www.ecologia.edu.mx/publicaciones/resumenes/10.1/Manson%202004.PDF>

- Martínez de Anguita. 2006. Desarrollo Rural Sostenible. McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U. p.526-58
- McIntyre, S. and Hobbs, R. 1999. A Framework for Conceptualizing Human Effects on Landscapes and Its Relevance to Management and Research Models. *Conservation Biology* 13(6): 1282-1292
- Mendoza, G.A. and Martins, H. 2006. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management* no.230: 1–22
- Millenium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis* (en línea). Island Press, Washington, DC.155 p. Consultado 5 ene. 2009. Disponible en: <http://www.millenniumassessment.org/en/index.aspx>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. 2003. Restauración de ecosistemas a partir de manejo de la vegetación- Guía metodológica. Primera edición, CONIF-Banco Mundial, Bogotá, Colombia. 98 p.
- Mittermeier R.A y Goettsch C. 1992. La importancia de la diversidad biológica en México. *Conservation International*. En: México ante los retos de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 14 p.
- Mokondoko Delgadillo, S.P. y Manson, R.H.2010. Valoración de servicios ambientales hidrológicos: Caso Río la Antigua(en línea). *Ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo de México*, no. 62.*Sólo resumen*. Consultado 28 sep. 2010. Disponible en: <http://pcti.mx>
- Muñoz, C.; Guevara, A.; Torres, J.M. y Braña, J. 2005. Paying for the Hydrological Services of Mexico's Forests: analysis, negotiations and results (en línea). Instituto Nacional de Ecología, México. 35 p. Consultado feb. 2010. Disponible en: http://www.ine.gob.mx/descargas/dgipea/draft_ecological_economics.pdf
- Myers, N.; Mittermeier, R. A.; Mittermeier, C. G.; Da Fonseca, G. A. B. y Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853-858
- Naidoo, R.; Balmford, A.; Costanza, R.; Fisher, B.; Green, R.E.; Lehner, B.; Malcolm, T. R.; Ricketts, T. H. 2008. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities. *PNAS* 105 (28): 9495–9500.
- Norberg, J. 1999. Linking Nature's services to ecosystems: some general ecological concepts. *Ecological Economics* no.29: 183–202
- Noss, R.F.1990. Indicators for monitoring Biodiversity: a hierarchical approach (en línea). *Conservation Biology* 4: 355-364. Consultado ene. 2010. Disponible en: http://maps.wildrockies.org/ecosystem_defense/Science_Documents/Noss_1990.pdf
- OIMT (Organización Mundial de las Maderas Tropicales).2002. Directrices de la OIMT para la restauración, ordenación y rehabilitación de bosques tropicales secundarios y degradados. Serie de políticas forestales no.13. 88 p.
- OIMT (Organización Mundial de las Maderas Tropicales);UICN (Union Internacional para la Conservación de la Naturaleza).2005. Restaurando el paisaje tropical. Serie técnica OIMT no.23. 158 p.
- Ordóñez, G. 2004. Pames- Pueblos indígenas del México contemporáneo(en línea). Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas- Programa de las Naciones Unidas

para el Desarrollo. Primera edición. México. 31 p. Consultado ene. 2010. Disponible en: http://www.cdi.gob.mx/index.php?option=com_docman&task=doc_details&Itemid=&gid=42
Pagiola, S.; Bishop, J.; Landell-Mills, N. 2006. La venta de servicios ambientales forestales. Segunda Edición. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Nacional de Ecología. 463 p.

Palmieri, A; Shah, F; Annandale, G; Dinar, A. 2003. Reservoir Conservation. Vol 1. The RESCON approach. Economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs. The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank. USA.

Peña, R; Dosapei, T.; Cuellar, E. Densidad y área mínima de acción del jaguar (*Panthera onca*) en dos épocas del año en Ravelo, Parque Nacional KaaIya, Santa Cruz, Bolivia.
MEMORIAS: Manejo de Fauna silvestre en Amazonia y Latinoamérica. p. 257-259

Poiani, K.; Richter, B.; Anderson M. y Richter H., 2000. Biodiversity Conservation at Multiple Scales: Functional sites, landscapes and networks. *BioScience* 50(2): 133-146.

Quétier, F.S; Lavorel, W.; Thuiller and Davies, I. 2007. Plant-trait-based modeling assessment of ecosystem-service sensitivity to land-use change. *Ecological Applications* 17 (8): 2377-86. doi:18213976.

Redford, K.H.; Coppolillo, P.; Sanderson, E.W.; Da Fonseca, G.A.B.; Dinerstein, E.; Groves, C.; Mace, G.; Maginnis, S.; Mittermeier, R.A.; Noss, R.; Olson, D.; Robinson, J.G.; Vedder, A. and Wright, M. 2003. Mapping the Conservation Landscape. *Conservation Biology* 17(1): 116-131

Reyes-Hernandez, H., L.; Olvera-Vargas, F.; Sahagun-Sanchez, F.; Mass-Causel, J. F. 2009. Transformations of the forest cover and future scenarios in the Sierra Madre Oriental, Physiographic region, San Luis Potosí, Mexico. *ISRSE* 33. 33 International Symposium on Remote Sensing of Environment. Sustaining the Millennium Development Goals. Disponible en: <http://isrse-33.jrc.ec.europa.eu>

Rodney, W. 2000. Flushing of sediments from reservoirs. Contributing paper. Thematic Review IV.5: Operation, Monitoring and Decommissioning of Damns, World Commission on Damns. 12 p.

Roy, P.S and Tomar, S. 2000. Biodiversity characterization at landscape level using geospatial Modelling technique (en línea). *Biological Conservation* 95: 95-109. Consultado en Enero de 2010. Disponible en: http://brandenburg.geoeology.uni-potsdam.de/users/schroeder/download/spatialstats_workshop/Roy2000BioConserv.pdf

Rzedowski, J. 1961. Vegetación del Estado de San Luis Potosí. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 230 p.

Rzedowski, J. 2006. Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 504 p.

Saaty, T. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15: 234-281

Sahagún, F. 2009. Dinámica espacio – temporal de la transformación en la cobertura vegetal y su impacto sobre la distribución y conservación de la avifauna en la Región de la Sierra Madre Oriental del Estado de San Luis Potosí, México. VII Convención Internacional sobre medio ambiente y desarrollo. Palacio de Convenciones, La Habana, Cuba. 8 p.

Salas, O.E.; R. S. Capin; J. J. Armesto; E. Berlow; J. Bloomfield; R. Dirzo; E. Hubber-Sanwald; L. F. Huenneke; R. B. Jackson; A. Kinzig; R. Leemans; D. M. Lodge; H. A. Mooney; M. Oesterheld; N. L. Poff; M. T. Sykes; B. H. Walker; M. Walker y D. H> Wall. 2000. Biodiversity – Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287: 1770-1774.

Sarukhán, J., *et al.* 2009. Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad (en línea). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México. 100 p. Consultado 14 mar.2010 Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalNatMex.html>

Schroth, G; da Fonseca, G.A.B; Harvey, C.A; Vasconcelos, H.L; Izac, A.M.(en prensa). *Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes*. Island Press. Washington,D.C. Fuente Original: Beer, J; Harvey, C.A; Ibrahim, M;Harmand, J.M; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003.Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas* 10(37-38): 80-87.

SEDUCOP. 2001. Plan de Desarrollo Urbano para el Estado de San Luis Potosí 2001-2020 (en línea). Versión síntesis. Gobierno del Estado de S.L.P.-Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 143 p. Consultado ene. 2010. Disponible en: http://ambiental.uaslp.mx/productos/pduslp/0_portad.htm

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales);NESTLE. 2000. Las Áreas Naturales Protegidas de México. 64 p.

Sendra, J. (s/f). SIG y Evaluación Multicriterio. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Presentación Power Point, 45 diapositivas.

Sierra, R; Campos, F; Chamberlin, J. 2002. Assessing biodiversity conservation priorities: ecosystem risk and representativeness in continental Ecuador. *Landscape Urban and Planning* 59:95-110.

Silveira, L. 2004. ECOLOGIA COMPARADA E CONSERVAÇÃO DA ONÇA-PINTADA (*PANTHERA ONCA*) E ONÇA-PARDA (*PUMA CONCOLOR*), NO CERRADO E PANTANAL.Tese apresentadaao Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal da Universidade de Brasília. Brasília – D.F. Janeiro de 2004. 240 p.

Somarriba, E. 1990. ¿Qué es agroforestería?. El Chasqui, boletín informativo sobre recursos naturalesrenovables, CATIE, no. 24: 5-13

Troy, A. and Wilson, M.A.2006. Mapping Ecosystem Services: Practical challenges and opportunities in linking GIS and value transfer. *Ecological Economics* no.60. p. 435 –449

Turner, M; Gardner, R; O'Neill, R. 2001. *Landscape ecology in theory and practice, pattern and process*. Springer. United States. 400 p.

UASLP (Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Mx). 2006a. Mapas de vegetación y uso de suelo en la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc. 1:50,000.Color

_____. 2006b. Trazo de la nueva carretera Valles-Río Verde en la Sierra Madre Oriental, SL.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc. 1:50,000.Color

_____. 2006c. Mapa de precipitación de la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc. 1:50,000.Color

_____. 2006d. Mapa de índice de marginación en la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc. 1:50,000.Color

_____. 2006e. Mapa de tenencia de la tierra en la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc. 1:50,000.Color

_____. 2006f. Mapa de densidad poblacional en la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc. 1:50,000.Color

_____. 2006g. Mapa de pendientes en la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc.1:50,000.Color

_____. 2006h. Mapa de probabilidad de cambio de uso del suelo en la Sierra Madre Oriental, S.L.P. México. FOSEC: SEMARNAT-CONACYT, 2006-CO1-12754. Esc. 1:50,000.Color

UICN (Union Internacional para la Conservación de la Naturaleza) .2009.Red List of Threatened Species (en línea). Version 2009.2. Consultado nov. 2009. Disponible en: www.iucnredlist.org.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2002. Hydrology and water management in the humid tropics. Technical Documents in Hydrology, no. 52. 480 p.

Valle, J. 2003. Nahuas de la Huasteca-Pueblos indígenas del México contemporáneo. Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (en línea). Primera edición. México. 31 p. Consultado ene. 2010. Disponible en: http://www.cdi.gob.mx/index.php?option=com_docman&task=doc_details&Itemid=&gid=32

Villordo-Galván, J.A. 2009. Distribución y estado de conservación del jaguar (*Panthera onca*) en San Luis Potosí, México. Tesis Mag.Sc. Colegio de Posgraduados. Texcoco, Estado de México. 90 p.

Villordo-Galván, J.A. 2009. Mapa de distribución potencial del jaguar en San Luis Potosí de acuerdo al Modelo MaxEnt, originado a partir de 26 registros de jaguar confirmados. Tesis Mag.Sc. Colegio de Posgraduados. Texcoco, Estado de México. Esc. 1:50,000.Color

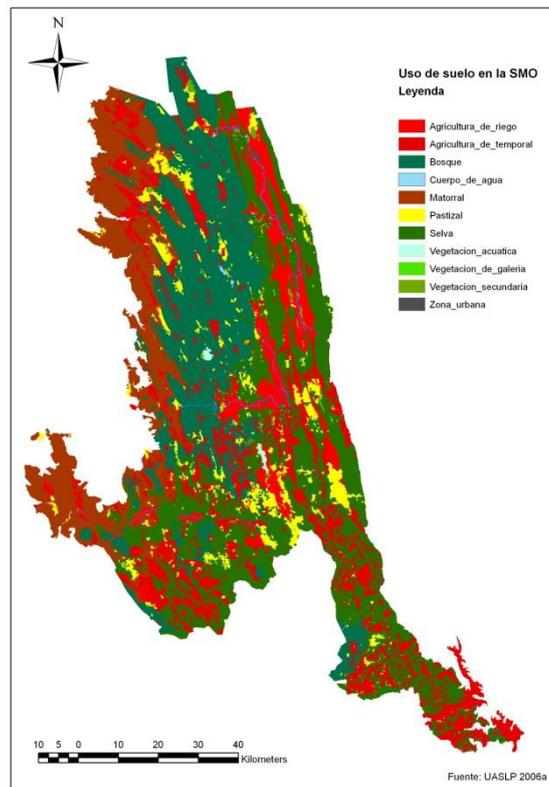
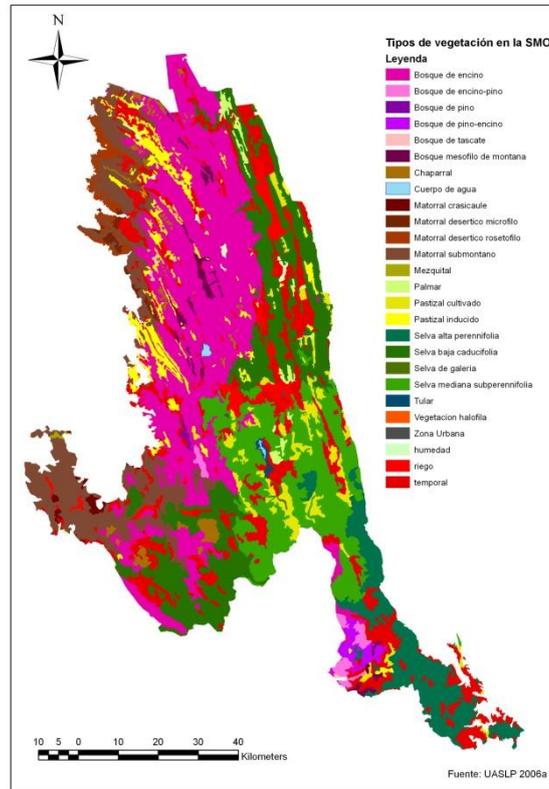
Waterways & Wetlands Works Manual. 2003. Environmental Best Practice Guidelines: Managing Riparian Vegetation,no.7 : 6 p.

Wong, S.L.; McCuen, R.H..1982. The Design of Vegetative Buffer Strips for Runoff and Sediment Control. Civil Engineering Department, University of Maryland, College Park, MD. Fuente original: Lee, P.; Smyth, C.; Boutin, S. 2003. Journal of Environmental Management 70 (2004): 165–180

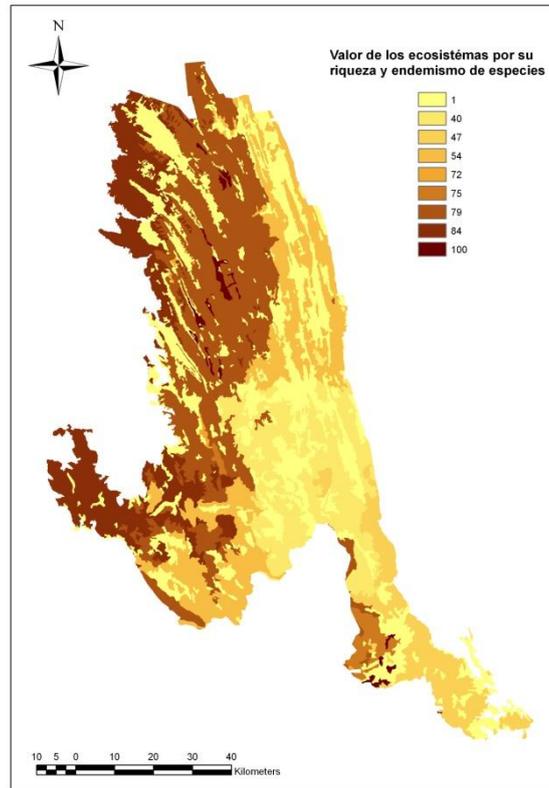
World Resources Institute. 2008. Ecosystem Services, a guide for decision makers.96 p.

ANEXOS

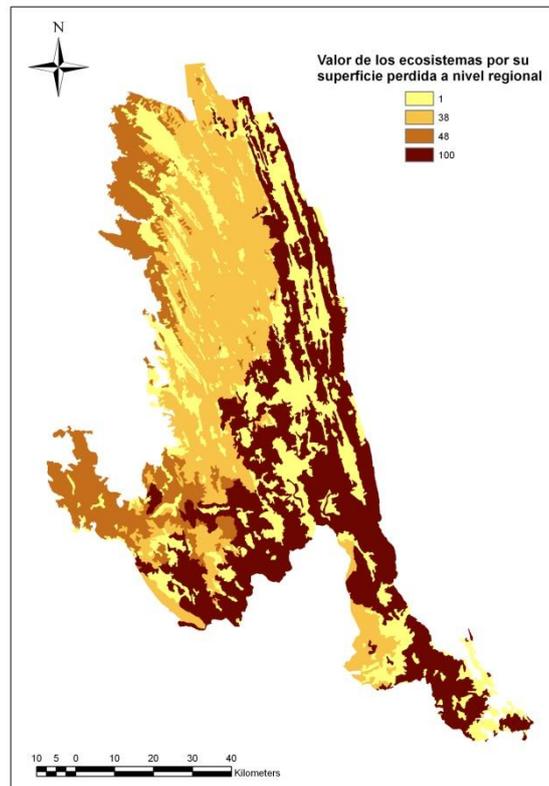
Anexo 1. Mapas de vegetación y uso de suelo en la SMO



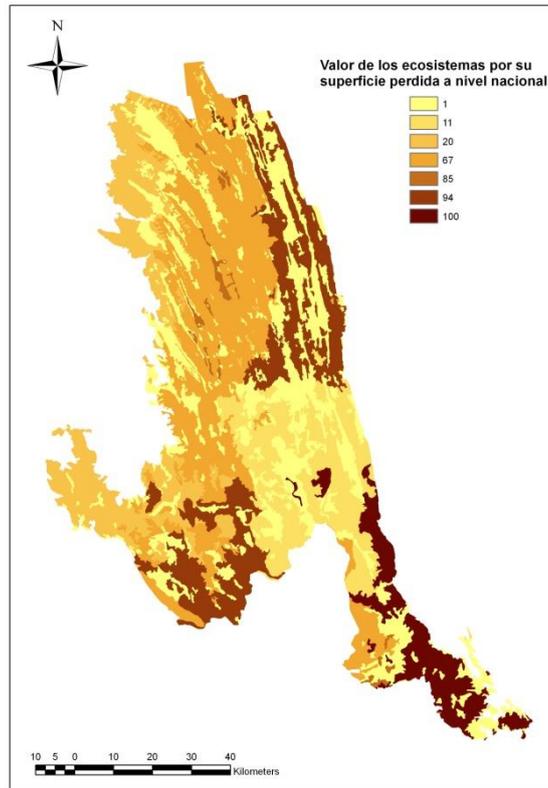
Anexo 2. Valor de los ecosistemas presentes en la SMO por su riqueza y endemismo de especies



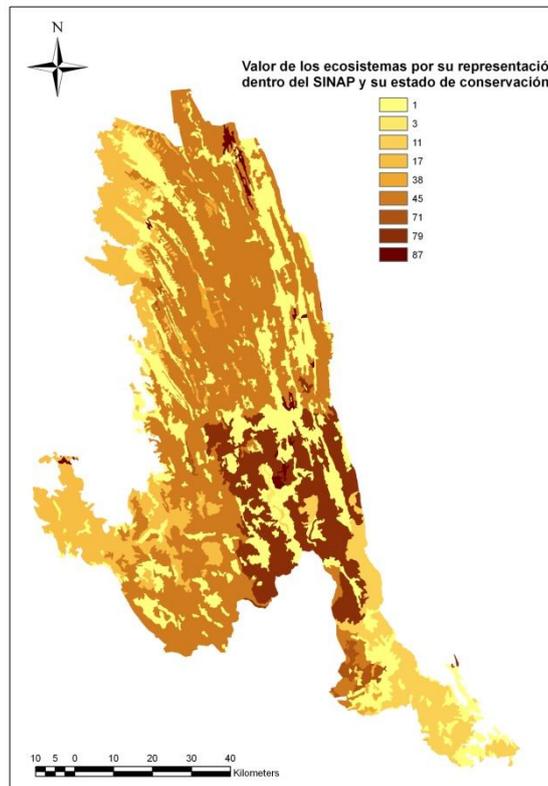
Anexo 3. Valor de los ecosistemas presentes en la SMO por su superficie perdida a nivel regional



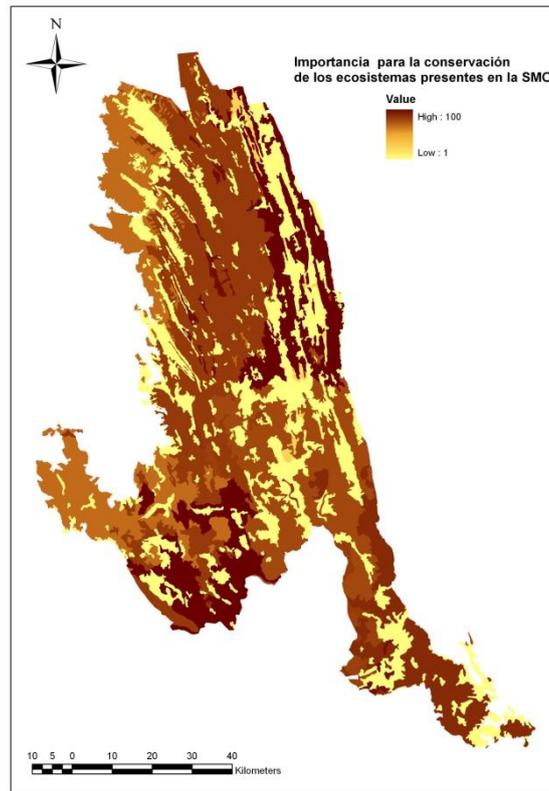
Anexo 4. Valor de los ecosistemas presentes en la SMO por su superficie perdida a nivel nacional



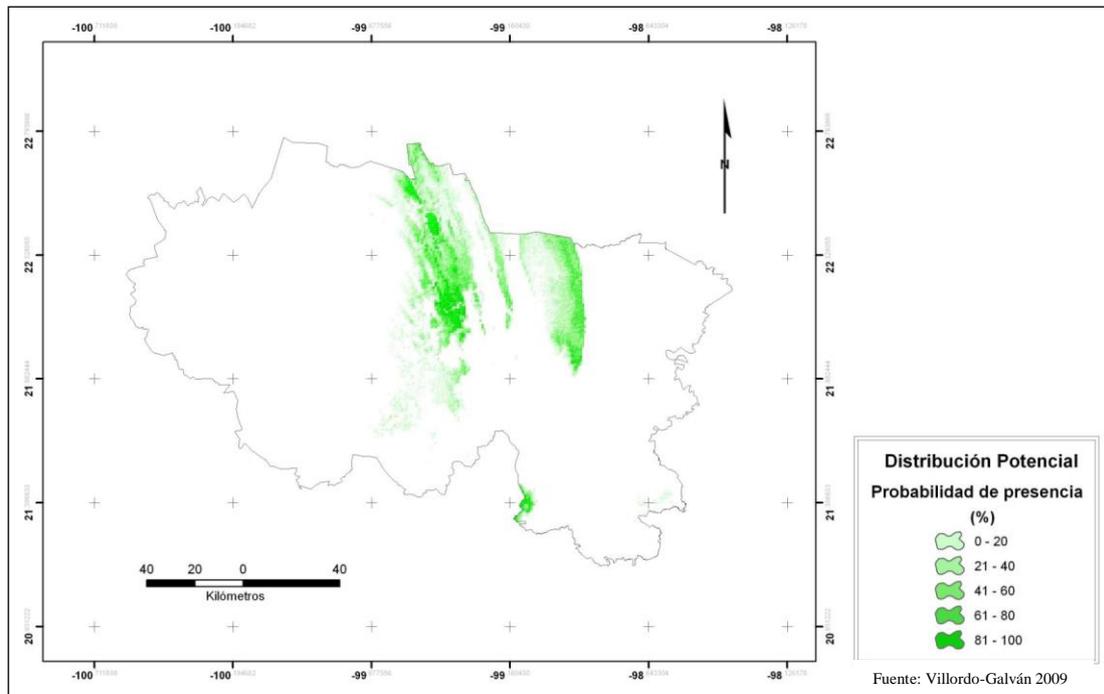
Anexo 5. Valor de los ecosistemas presentes en la SMO por su Representación dentro del SINAP



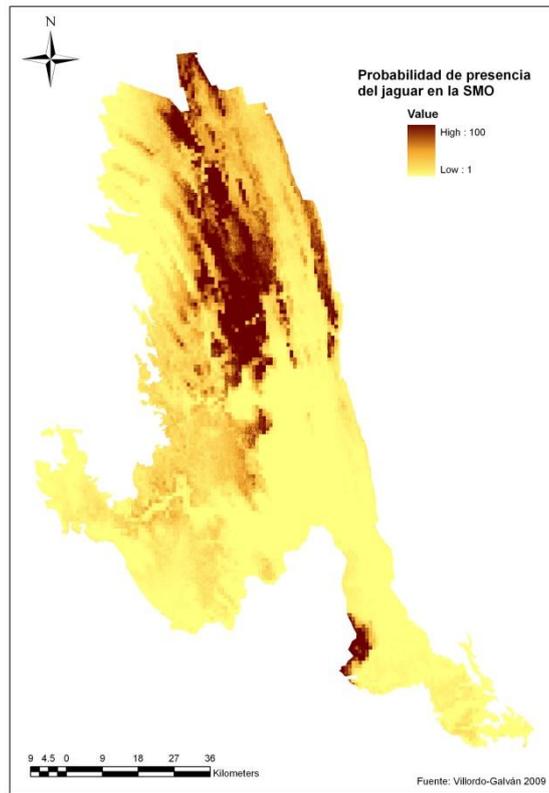
Anexo 6. Importancia para la conservación de los ecosistemas presentes en la SMO



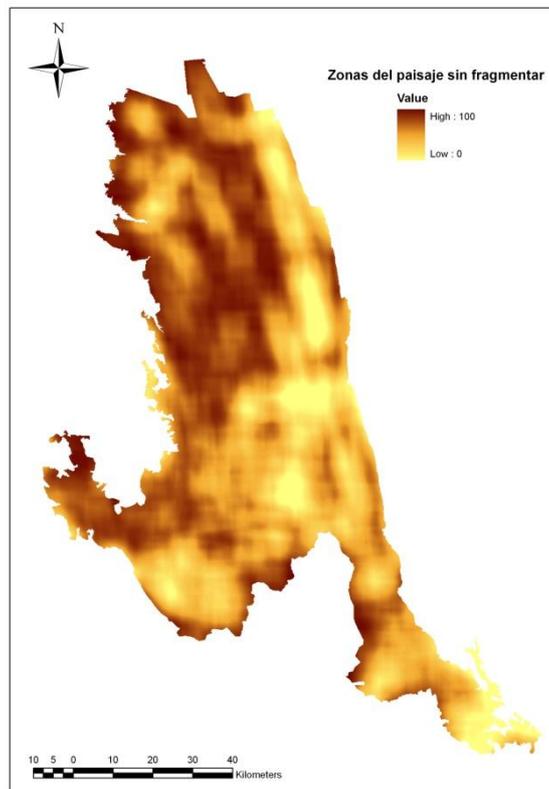
Anexo 7. Mapa de distribución potencial del jaguar en San Luis Potosí, originado a partir de 26 registros de jaguar confirmados



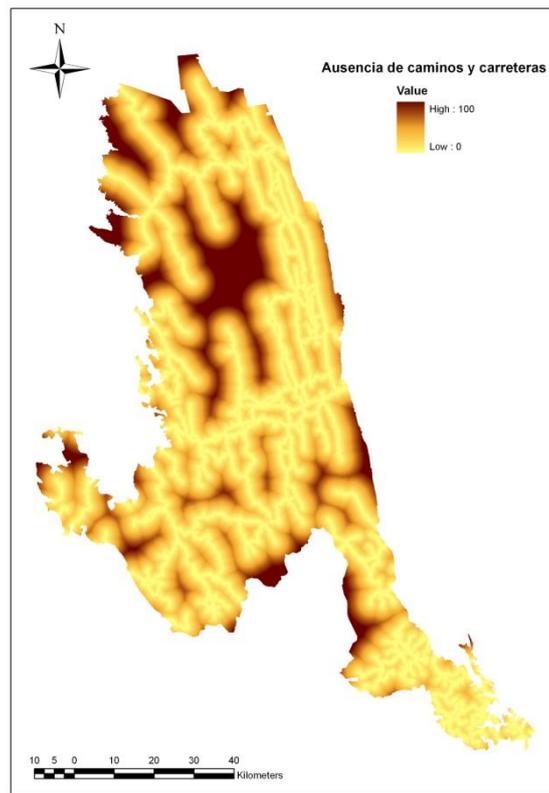
Anexo 8. Distribución de especies importantes para la conservación



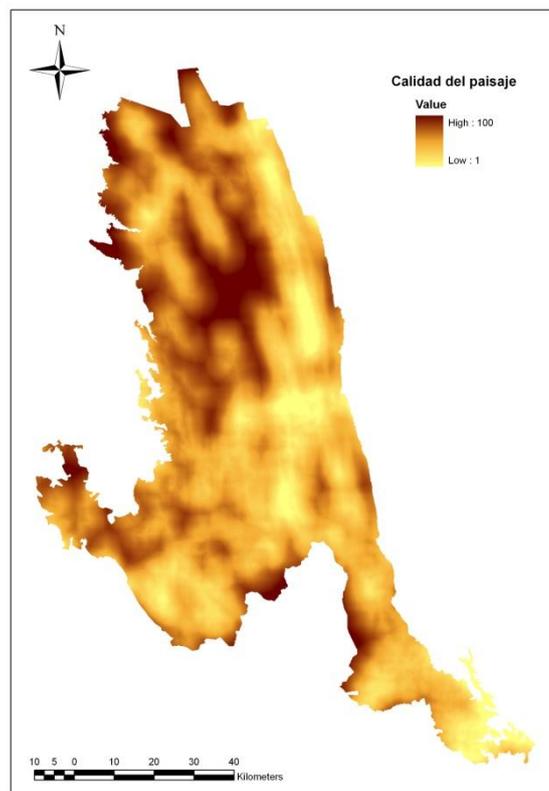
Anexo 9. Fragmentación



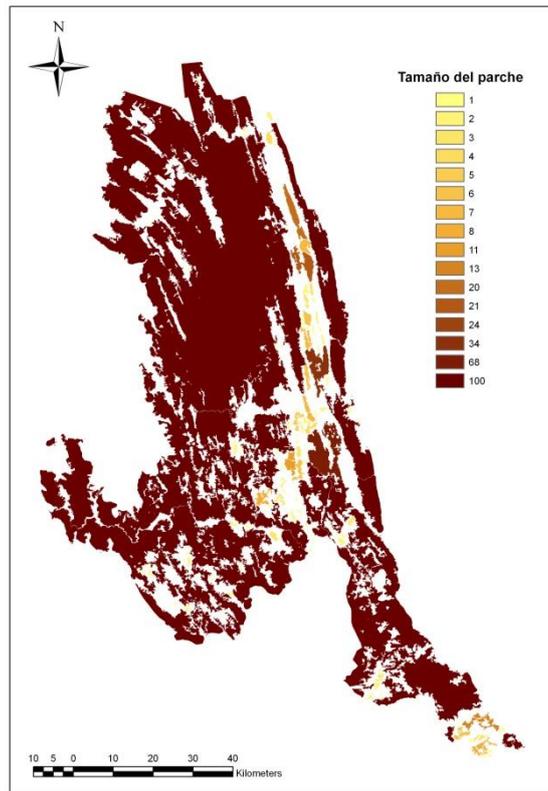
Anexo 10. Densidad de caminos y carreteras



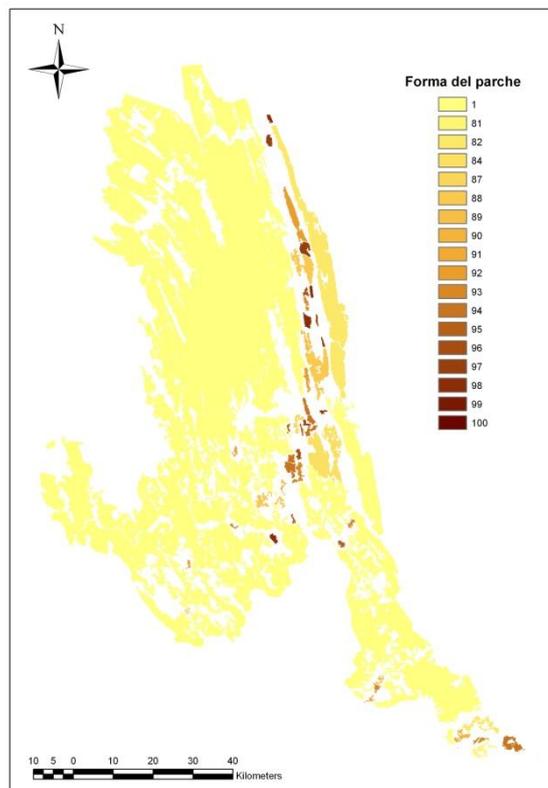
Anexo 11. Calidad del paisaje



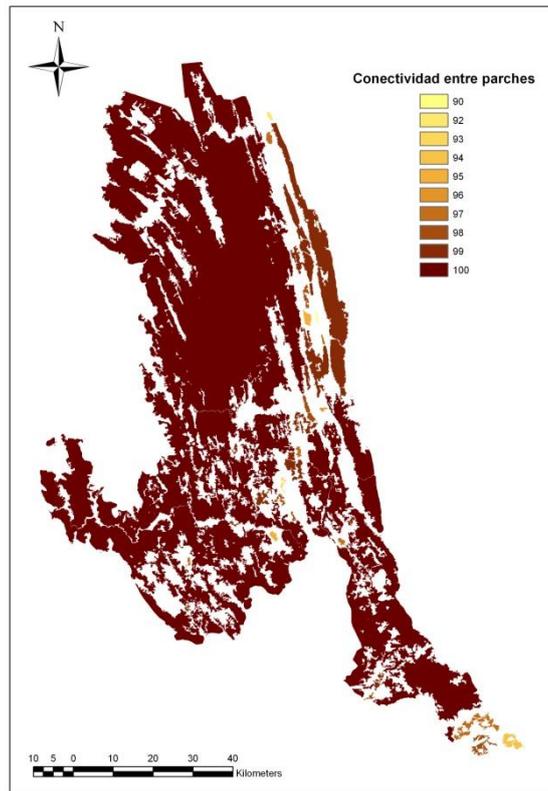
Anexo 12. Tamaño del parche



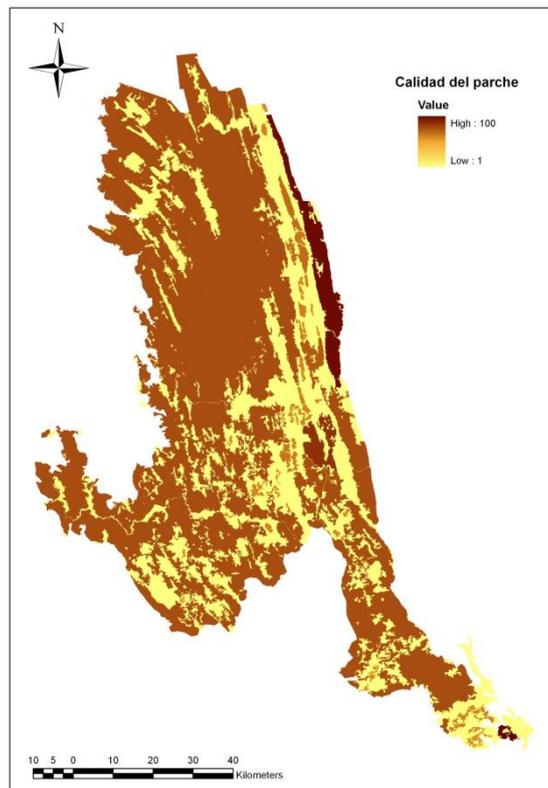
Anexo 13. Forma del parche



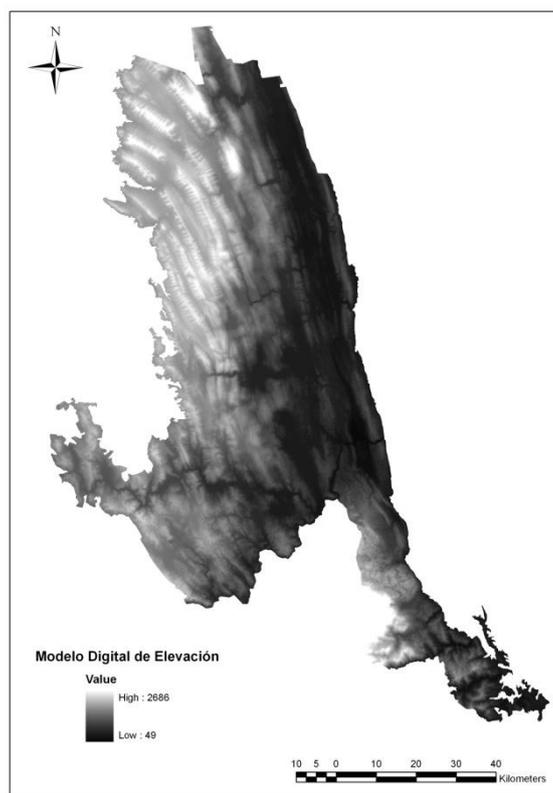
Anexo 14. Conectividad



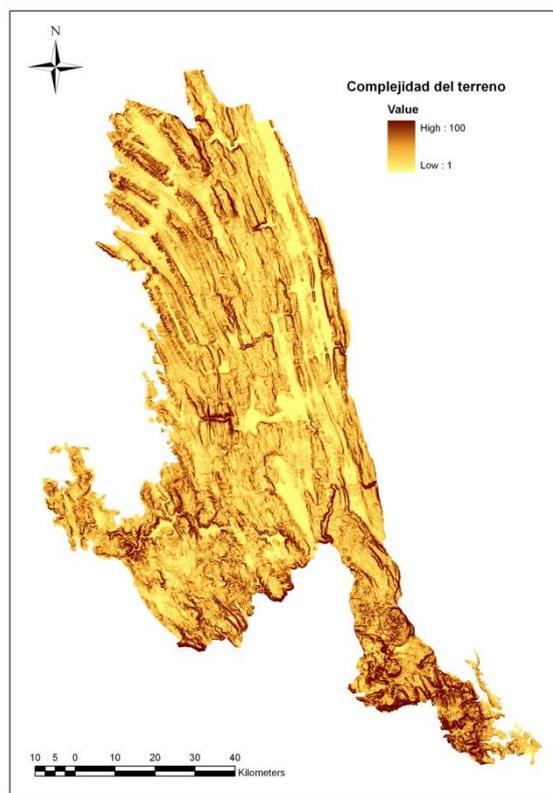
Anexo 15. Calidad del parche



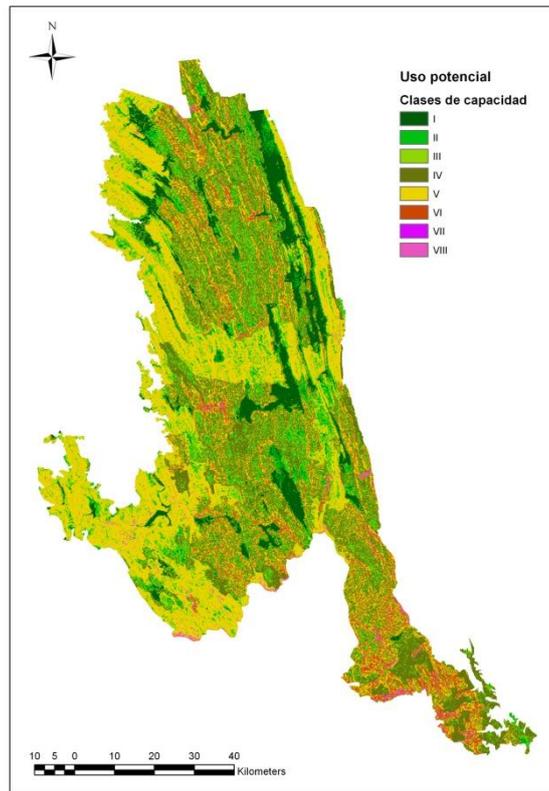
Anexo 16. Modelo Digital de Elevación de la SMO



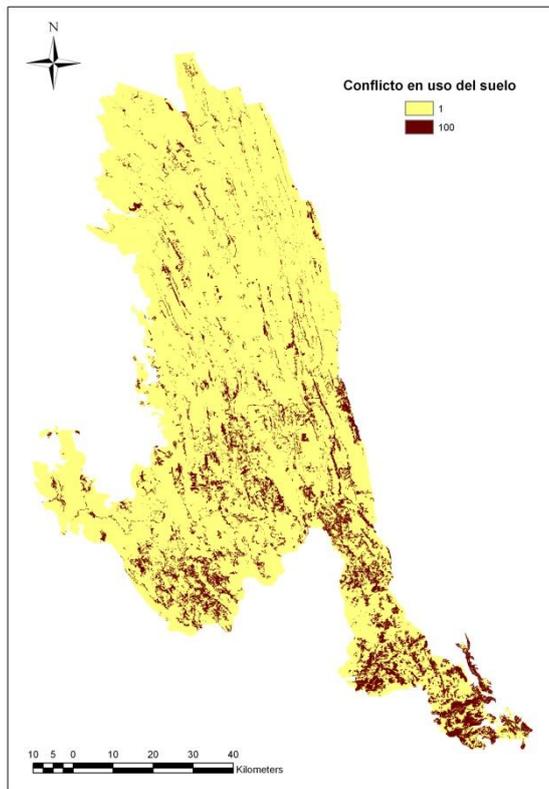
Anexo 17. Complejidad del terreno



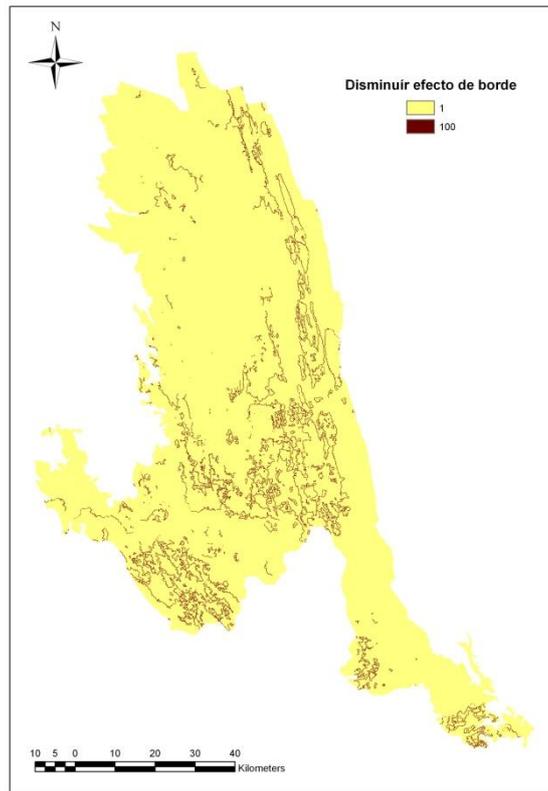
Anexo 18. Mapa de uso potencial en la SMO



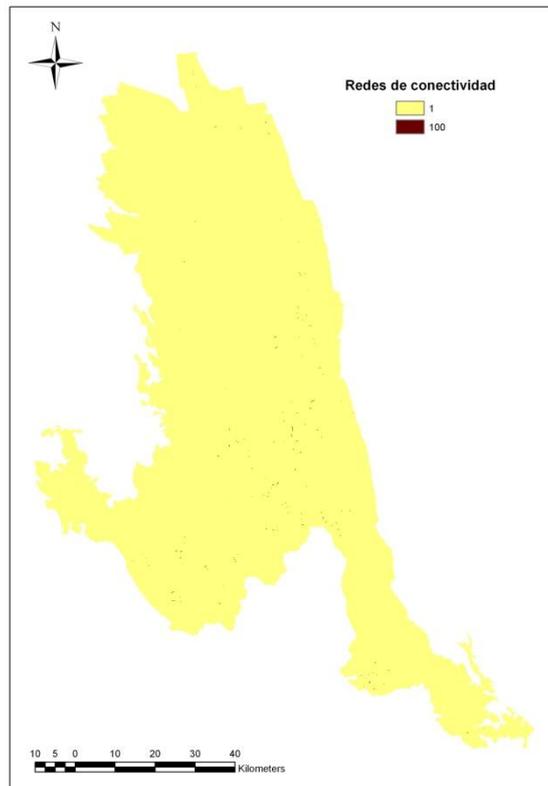
Anexo 19. Conflicto en uso del suelo



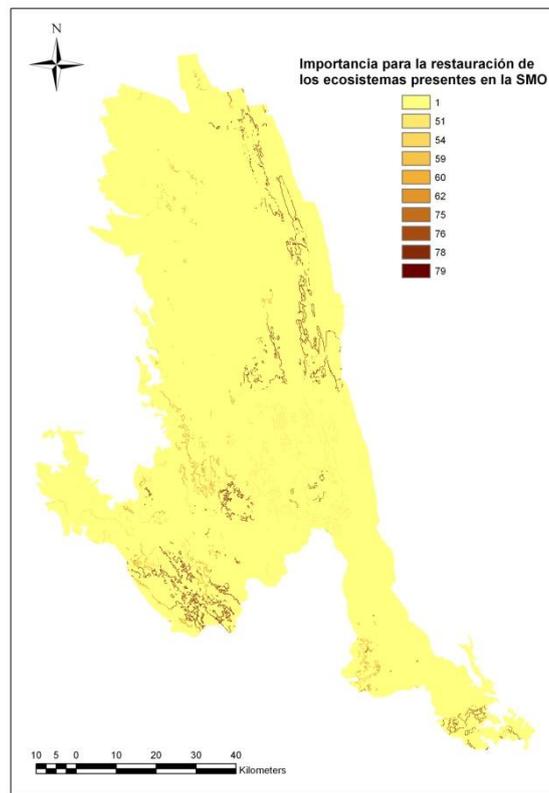
Anexo 20. Disminuir efecto de borde en parches de ecosistemas naturales



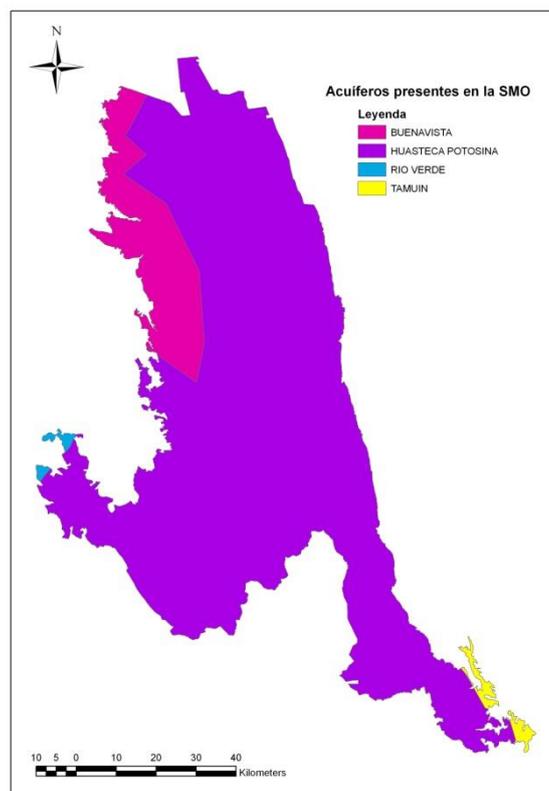
Anexo 21. Restablecer la conectividad entre parches de ecosistemas naturales al menor costo



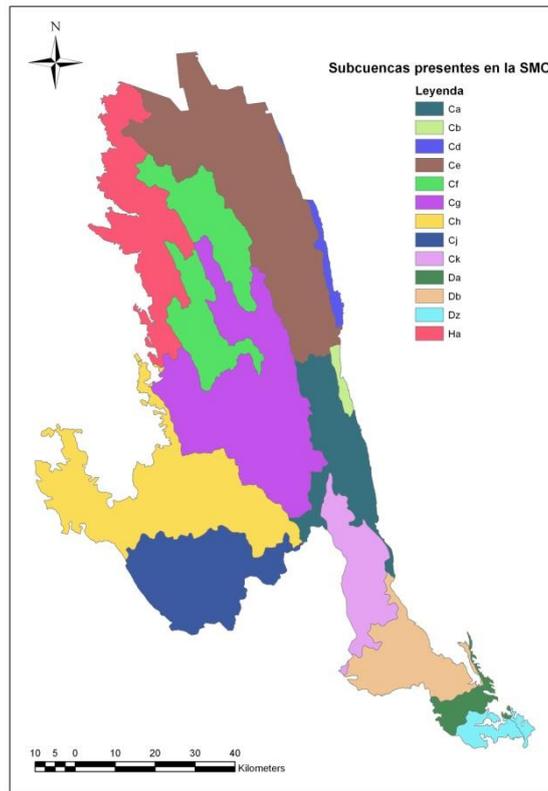
Anexo 22. Importancia para la restauración de los ecosistemas presentes en la SMO



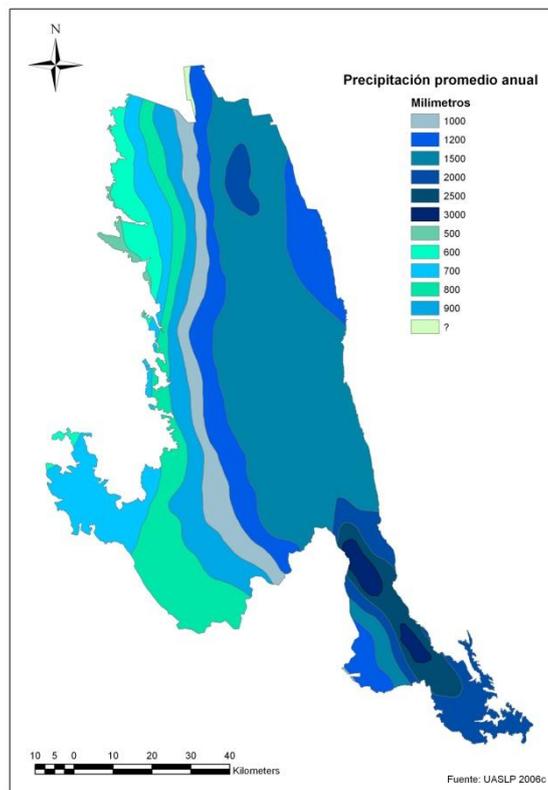
Anexo 23. Acuíferos de la SMO



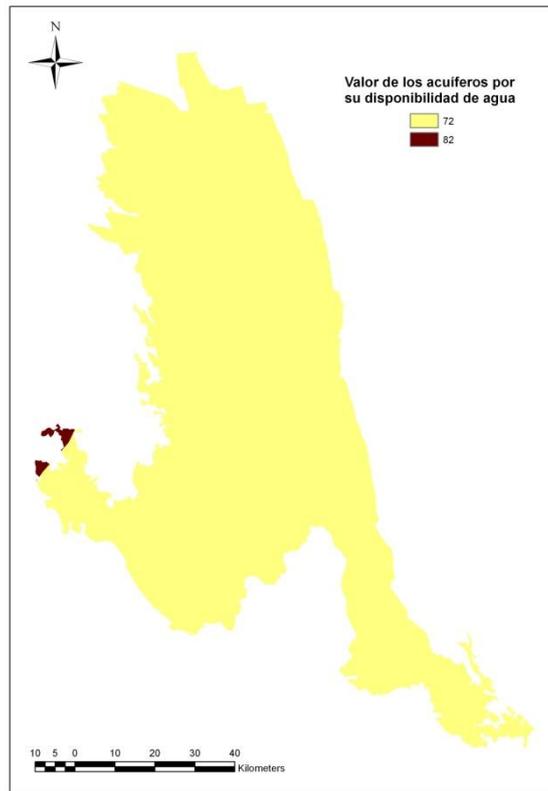
Anexo 24. Subcuencas de la SMO



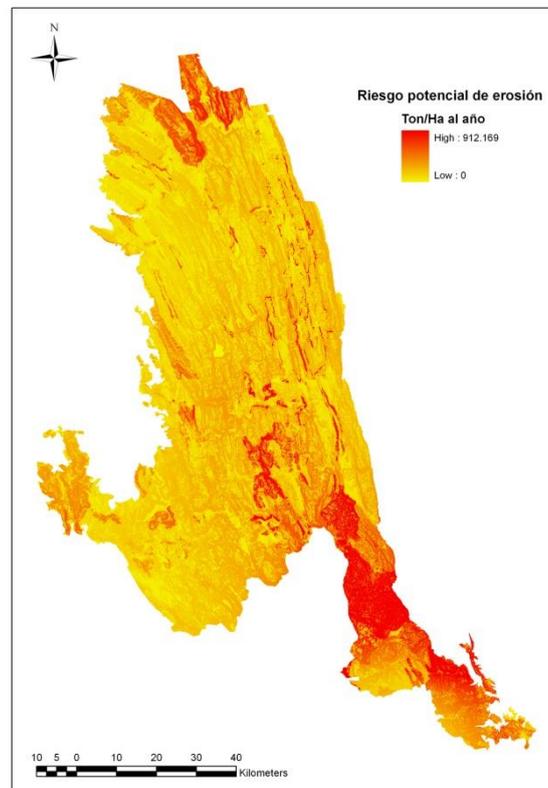
Anexo 25. Mapa de precipitación promedio anual en la SMO



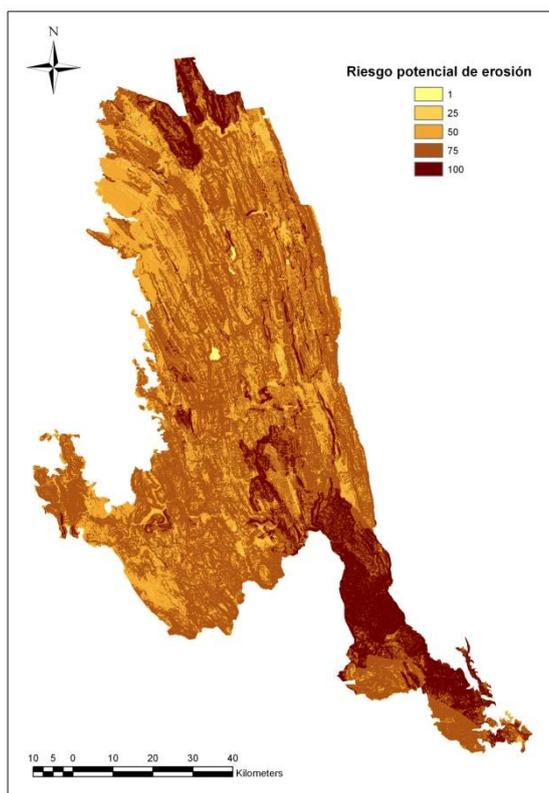
Anexo 26. Disponibilidad de agua subterránea



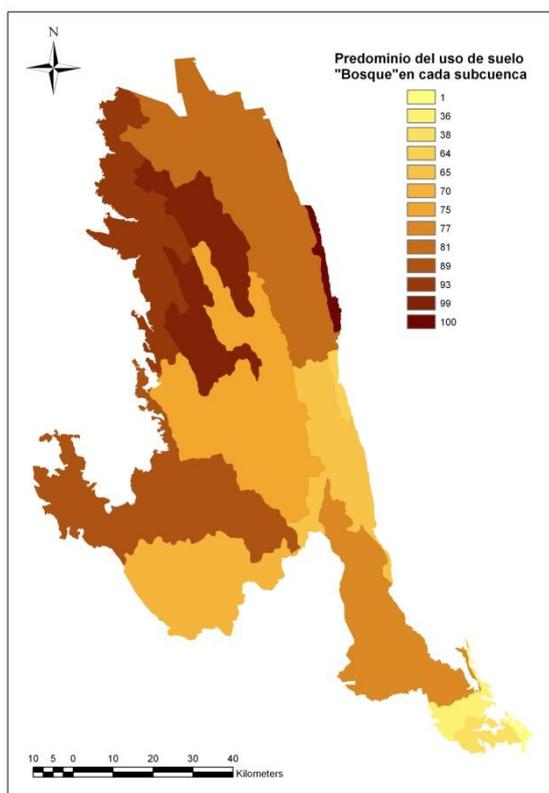
Anexo 27. Mapa de riesgo potencial de erosión en la SMO



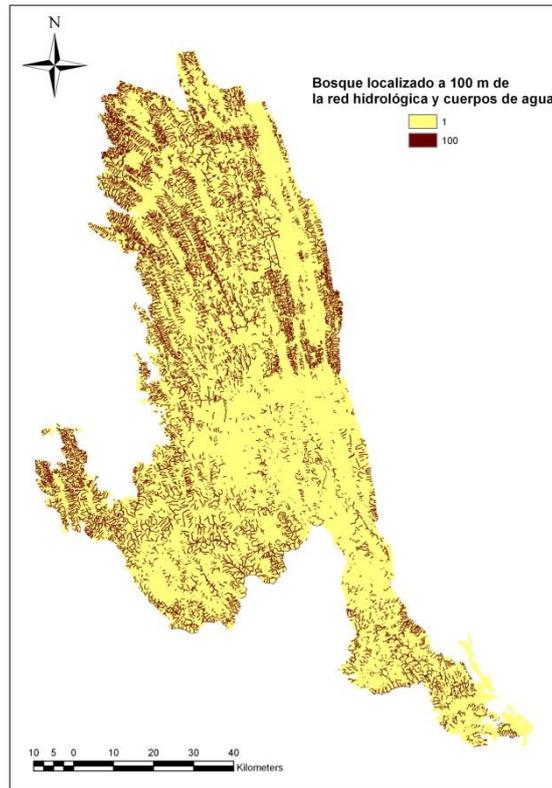
Anexo 28. Riesgo potencial de erosión



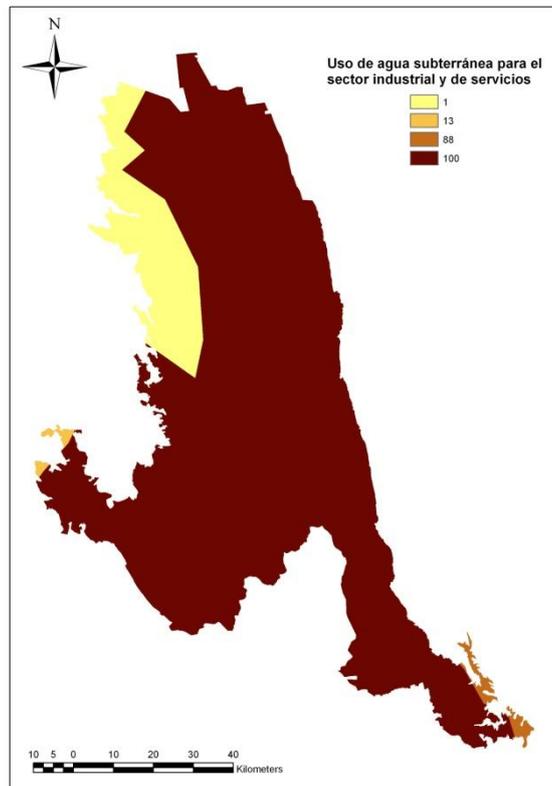
Anexo 29. Usos del suelo y su aporte a la calidad del agua



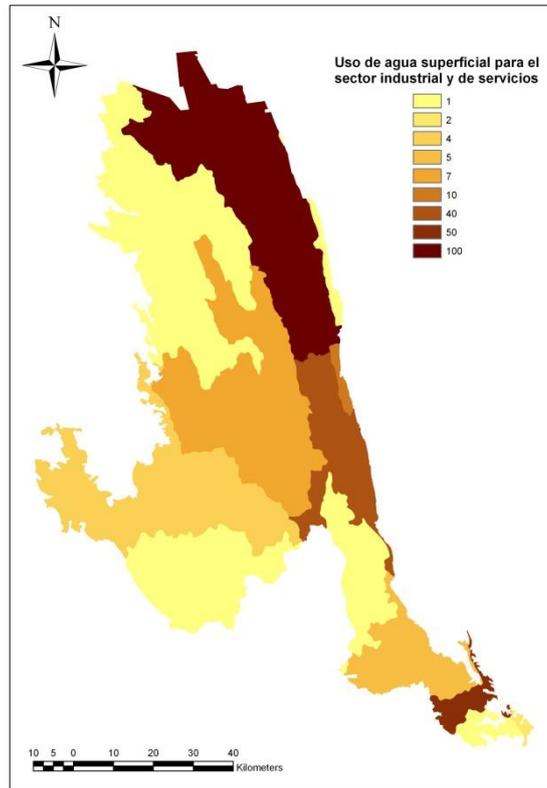
Anexo 30. Regulación de sedimentos sobre cuerpos de agua a través de la conservación de vegetación forestal en sus alrededores



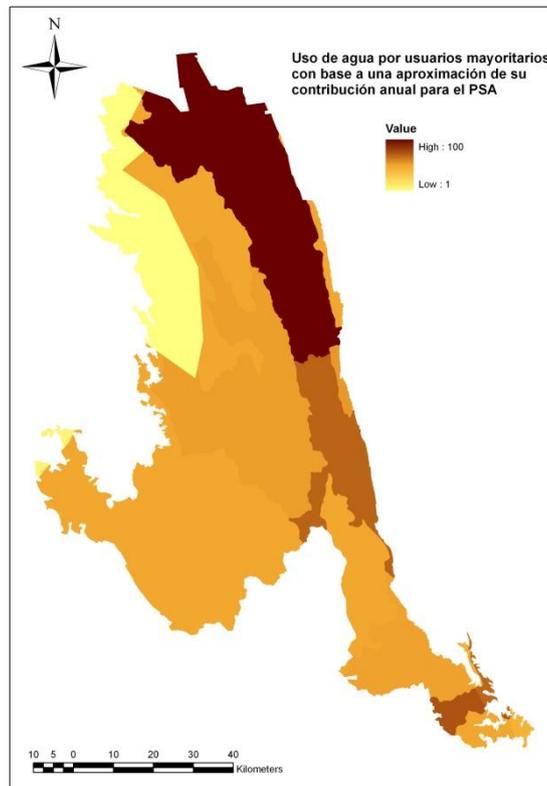
Anexo 31. Uso de agua subterránea para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA)



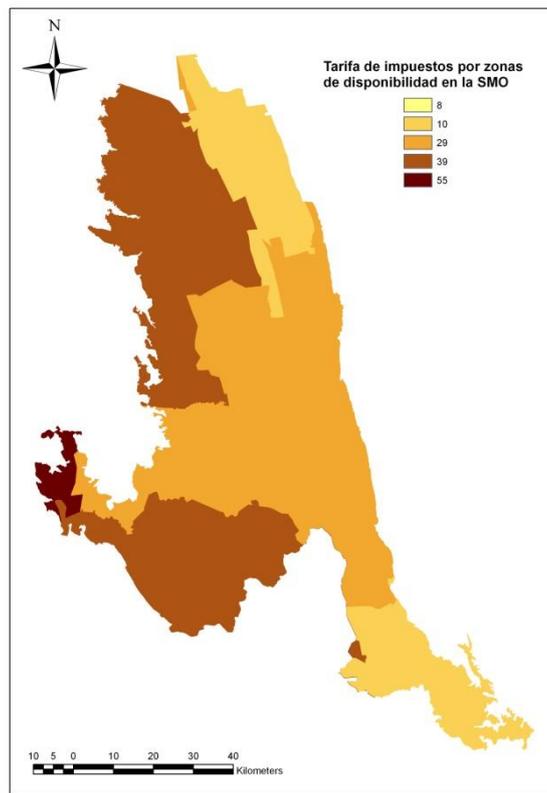
Anexo 32. *Uso de agua superficial para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA)*



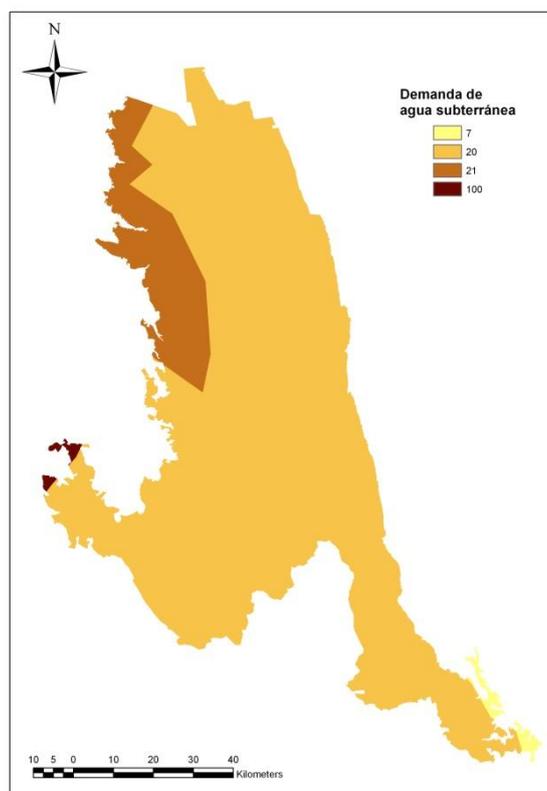
Anexo 33. *“Uso de agua para el sector industrial y de servicios con base a la tarifa de impuestos (aproximación de su contribución anual para el PSA)”*



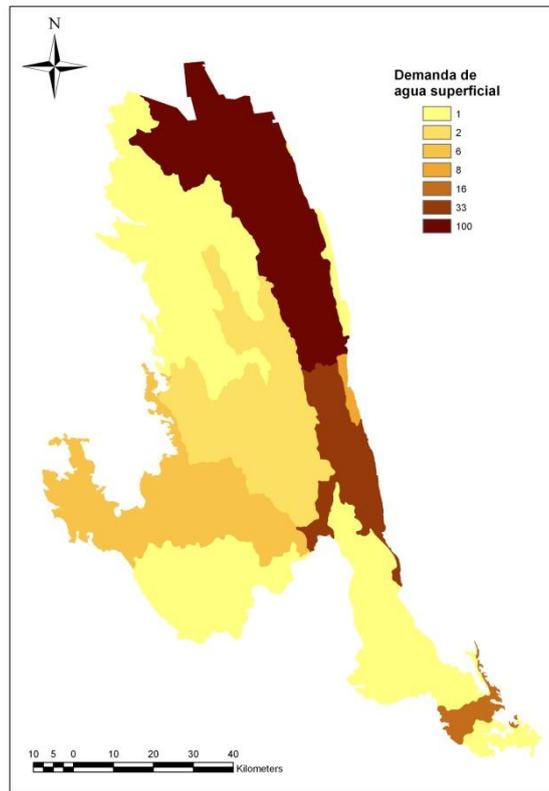
Anexo 34. Tarifa de impuestos por zona de disponibilidad establecida en la LFD



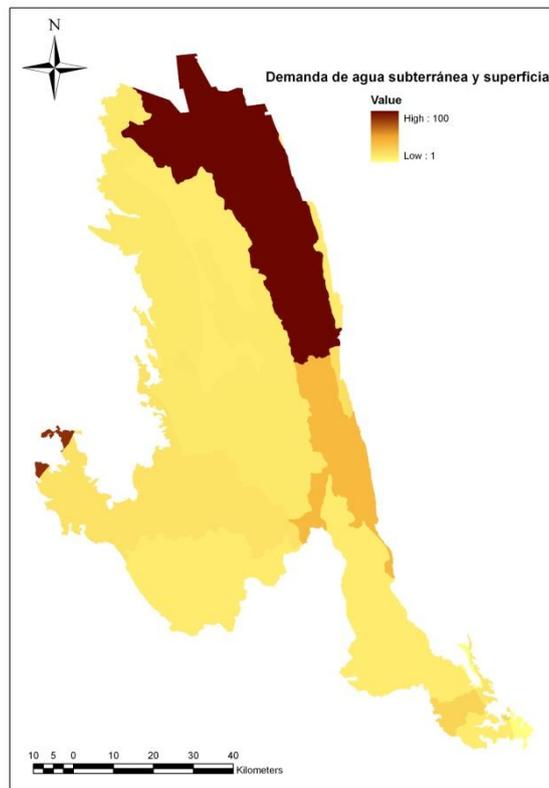
Anexo 35. Acuífero con mayor demanda de agua dentro del estado de San Luis Potosí



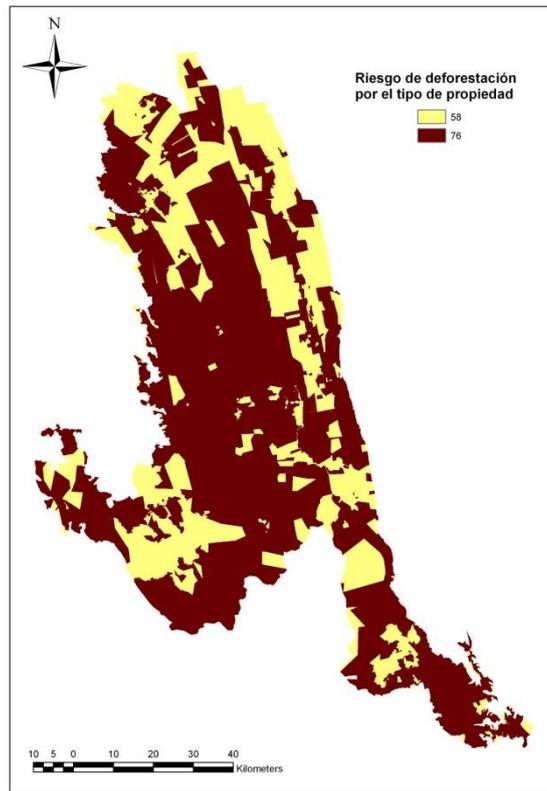
Anexo 36. Subcuenca con mayor demanda de agua dentro del estado de San Luis Potosí



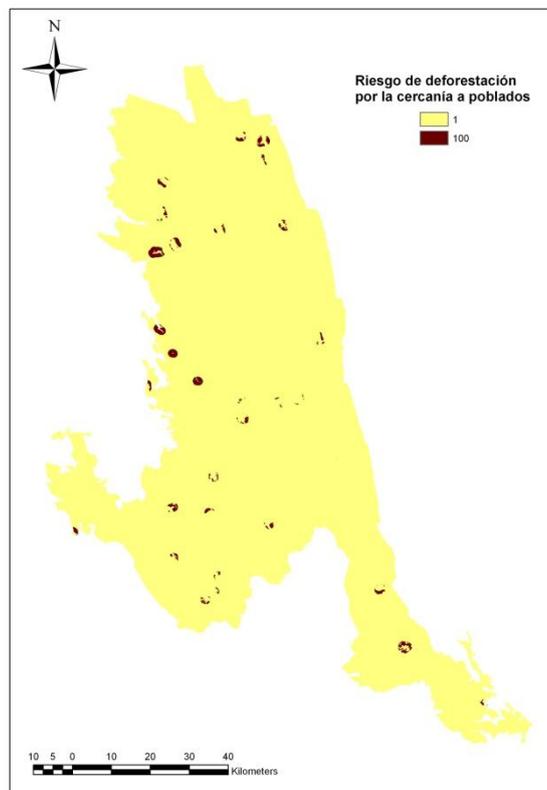
Anexo 37. Acuífero y subcuenca de la SMO con mayor demanda de agua dentro del estado de San Luis Potosí



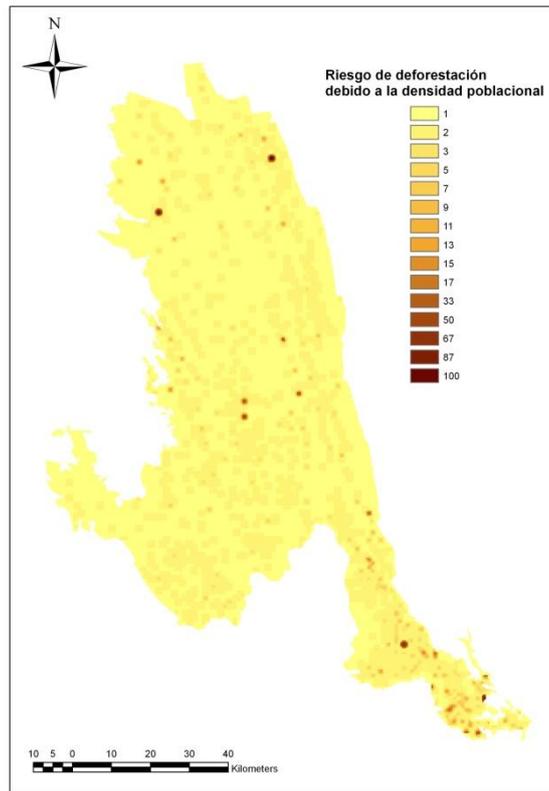
Anexo 38. Riesgo de deforestación por Tenencia de la tierra



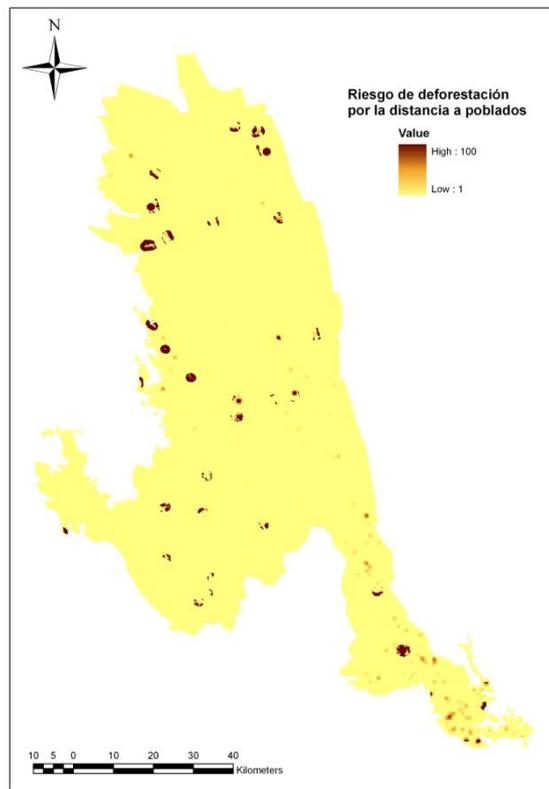
Anexo 39. Riesgo de deforestación por Cercanía a poblados



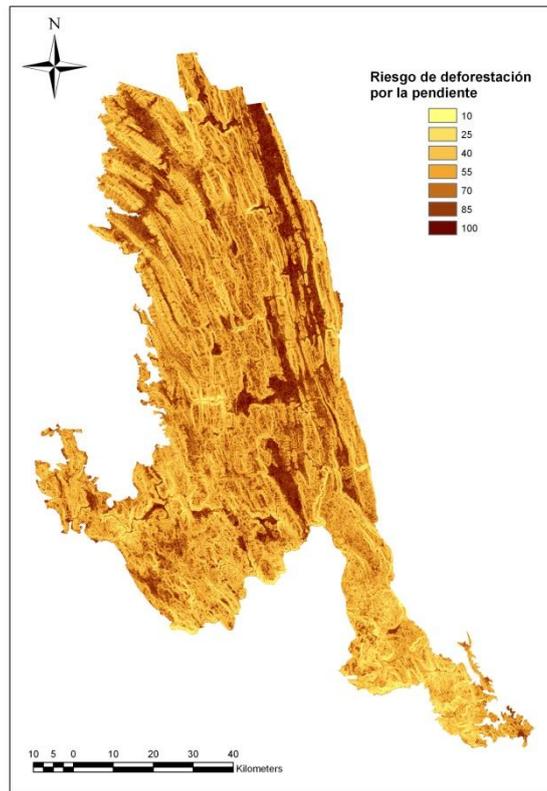
Anexo 40. Riesgo de deforestación por Densidad poblacional



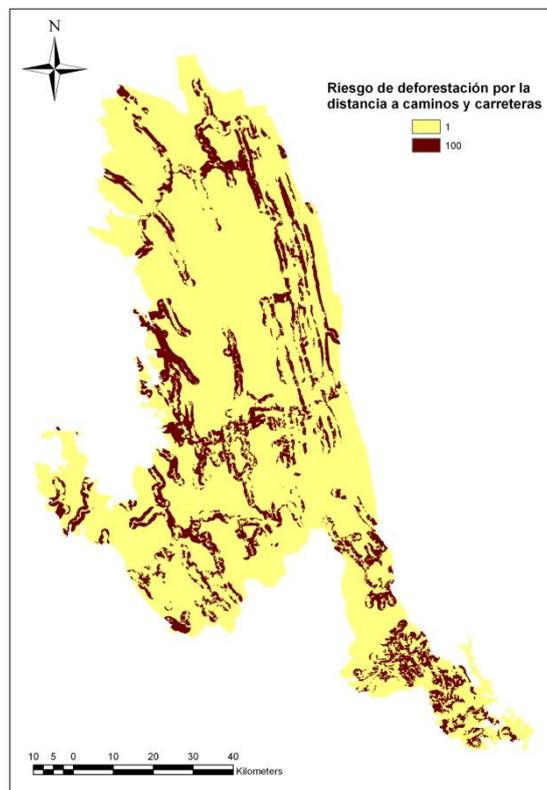
Anexo 41. Riesgo de deforestación por Distancia a poblados



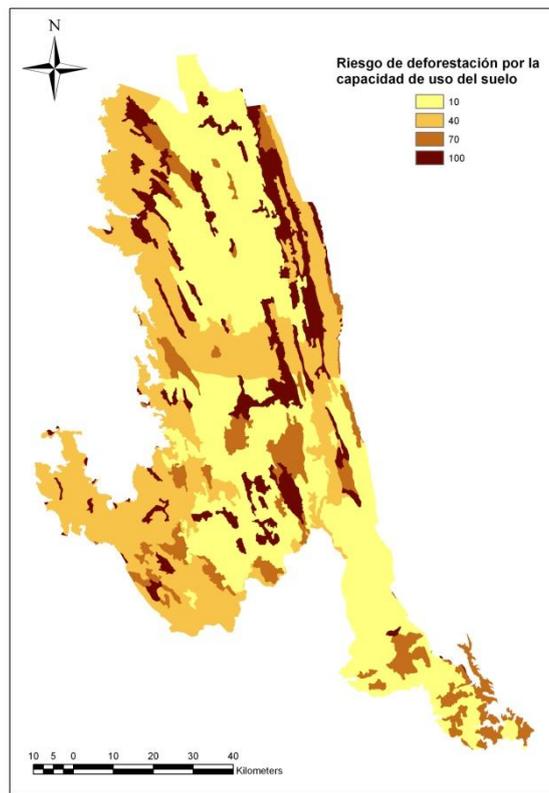
Anexo 42. Riesgo de deforestación por la Pendiente



Anexo 43. Riesgo de deforestación por Distancia a caminos y carreteras



Anexo 44. Riesgo de deforestación por la Capacidad de uso del suelo



Anexo 45. Riesgo de deforestación por la Probabilidad de cambio de uso del suelo

