

Técnicas de evaluación multicriterio, lógica difusa y Sistemas de Información Geográfica como herramientas para el ordenamiento territorial

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Recursos Naturales

Juana María López

Licenciada en Sistemas de Información – Universidad Nacional de Santiago del Estero
2010

Lugar de trabajo: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación
Experimental Agropecuaria Santiago del Estero.



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Marcos Texeira

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de la República, UDELAR, Montevideo,
Uruguay)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Consejero de Estudios

José María Paruelo

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

PhD (Colorado State University)

JURADO DE TESIS

JURADO

Marcos Horacio Easdale

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Córdoba)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Diego Omar Ferraro

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Federico Weyland

Licenciado en Ciencias Biológicas (Universidad de Buenos Aires)

Doctor en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

Fecha de defensa de la tesis: 4 de Abril de 2018

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

.....
Juana María López

A mis padres y hermanos

A mi hijo Nahuel

Quiero agradecer especialmente a mi director Marcos Texeira y a mi consejero de estudios José María Paruelo, por sus valiosos aportes, sus recomendaciones tan oportunas, sus lecturas y correcciones minuciosas. Fundamentalmente les agradezco sus comentarios alentadores y el trato ameno que recibí en todo momento.

Agradezco a mi amiga y compañera de trabajo del INTA Santiago del Estero, Gabriela Barraza, por acudir en mi ayuda, cada vez que se lo pedí.

Agradezco también al grupo de trabajo del Laboratorio de Teledetección y SIG de INTA Salta, especialmente a José Volante y Hernán Elena, por compartir la información y por la buena voluntad para colaborar en lo que se les requiere.

A mis compañeros de trabajo de INTA Santiago del Estero, Dario Coria, Guillermo Merletti, Ramiro Salgado y a José Volante de INTA Salta por colaborarme en la engorrosa tarea de la ponderación de los criterios.

A Santiago Banchemo por orientarme y darme los consejos acerca de las primicias de la programación en software libre, por su buena voluntad y apoyo constantes.

Agradezco también a mis compañeros de trabajo de INTA Santiago del Estero, con quienes compartimos a diario y nos apoyamos para lograr nuestras metas.

Por último, agradezco al INTA, una institución de excelencia, a la cual estoy orgullosa de pertenecer, por brindarme la posibilidad de realizar mis estudios de postgrado. En especial a los Dres. Cristina Angueira y Daniel Prieto por estimular y avalar el pedido de formación de Postgrado.

De igual manera, agradezco a la EPG de la FAUBA, por brindar el espacio de formación con docentes de reconocida trayectoria y personal administrativo serio y eficiente.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. Introducción general.....	1
1.1. Marco teórico.....	3
1.1.1 El ordenamiento territorial del Noroeste Argentino.....	3
1.1.2. Herramientas para el ordenamiento territorial	5
1.1.3. Análisis de sensibilidad e incertidumbre.....	8
1.2. Área de estudio, justificación, objetivos y actividades.	8
1.2.1. Área de estudio	8
1.2.2. Justificación	9
1.2.3. Objetivos	11
1.2.3.1. Objetivo General.....	11
1.2.3.2. Objetivos Específicos.....	11
1.2.4. Actividades específicas	11
1.3. Marco conceptual, metodológico y organización de la tesis.....	12
1.3.1. Marco conceptual.....	12
1.3.2 Metodología	12
1.3.3. Organización de la tesis	13
1.4. Bibliografía	16
CAPITULO 2. Zonificación Biofísica, Socio-económica y Político-institucional.....	21
2.1. Introducción	23
2.2. Materiales y Métodos.....	24
2.2.1. Zonificación biofísica	24
2.2.2. Zonificación socio-económica	29
2.2.3. Zonificación político-institucional.....	33
2.3. Resultados	33
2.4. Discusión y conclusiones	42
2.4.1. A cerca de los resultados.....	42
2.4.2. Acerca de la metodología.....	47
2.5. Bibliografía	49
CAPÍTULO 3: Evaluación de capacidad de acogida para distintos usos	53
3.1. Introducción	55
3.2. Materiales y Métodos.....	57
3.2.1. Introducción a la lógica difusa.....	58

3.2.2. Escala.....	58
3.2.3. Metodología.....	59
3.3. Sistema de inferencia basados en reglas difusas para la evaluación de capacidad de acogida de uso	77
3.4. Resultados.....	81
3.5. Discusión y conclusiones.....	87
3.5.1. A cerca de los resultados	87
3.5.2. A cerca de la metodología	88
3.6. Bibliografía.....	89
CAPÍTULO 4: Análisis de sensibilidad e incertidumbre	93
4.1. Introducción.....	95
4.2. Objetivos.....	96
4.3. Materiales y métodos.....	97
4.3.1. Cuantificación de la variación de los resultados a partir de los cambios de definición de los modelos.....	97
4.3.2. Aplicación de un método de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito.	105
4.4. Resultados.....	107
4.4.1. Cuantificación de la variación de los resultados a partir de los cambios de definición de los modelos.....	107
4.4.2. Aplicación de un método de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito.	121
4.5. Conclusiones.....	125
4.6. Bibliografía.....	127
CAPÍTULO 5: Conclusiones generales.....	131
5. Conclusiones Generales.....	133
5.1. Acerca de la metodología	133
5.2. A cerca de los resultados	138
5.2.1. Resultados de las zonificaciones biofísicas, socio-económicas y político-institucional del NOA	138
5.2.2. Resultados de la aptitud y el uso de los suelos en el Departamento Anta.	139
5.3. Fortalezas y debilidades de la propuesta metodológica.....	142
5.4. Bibliografía.....	146
Apéndice A.....	149
Apéndice B	165
Descripción del SADE	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Normativas de aprobación del Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos en la región NOA.....	4
Tabla 2.1. Estadísticos resumen de las variables bioclimáticas. En celeste se muestran las variables con coeficientes de variación mayores al 50%.....	26
Tabla 2.2. Matriz de correlación de las variables con coeficientes de variación mayores al 50%. En rojo se resaltan los coeficientes de correlación mayores a 0,7.	27
Tabla 2.3. Autovalores, porcentaje de variabilidad total y variabilidad total acumulada por los factores seleccionados.....	28
Tabla 2.4. Tabla de saturaciones o cargas. En rojo se resaltan las saturaciones más altas (valores mayores a 0,7 o menores a -0,7) que identifican las variables con mayor asociación con el factor.	28
Tabla 2.5. Regiones socio-habitacionales obtenidas a través del procedimiento análisis de encadenamiento en un segundo nivel de agrupamiento y valores de correlación de las unidades que conformaron el par recíproco, núcleo de la región.....	32
Tabla 2.6. Categorías asignadas a los rangos de valores de la matriz de especificidad	32
Tabla 2.7. Valores medios de las variables bioclimáticas para cada una de las zonas.....	35
Tabla 3.1. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para uso agrícola.....	61
Tabla 3.2. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.....	61
Tabla 3.3. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para el aprovechamiento forestal del bosque nativo.	62
Tabla 3.4. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.....	63
Tabla 3.5. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para el Ecoturismo.....	63
Tabla 3.6. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.....	64
Tabla 3.7. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para Conservación	65
Tabla 3.8. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.....	66
Tabla 3.9. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para Ganadería extensiva.....	67
Tabla 3.10. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.....	67
Tabla 3.11. Datos primarios: escala de los datos vectoriales, resolución de los datos raster y fuente.	68
Tabla 3.12. Puntos de inflexión de las funciones de pertenencia difusas	69
Tabla 3.13. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para agricultura. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7	71
Tabla 3.14. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para aprovechamiento forestal del bosque nativo. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7.....	71

Tabla 3.15. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para ecoturismo. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7	72
Tabla 3.16. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para conservación. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7	72
Tabla 3.17. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para ganadería extensiva. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7	73
Tabla 3.18. Valores de índices de consistencia aleatorio (RI) para diferentes órdenes de matrices	74
Tabla 3.19. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Agrícola	75
Tabla 3.20. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Aprovechamiento forestal del bosque nativo	75
Tabla 3.21. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Ecoturismo.....	75
Tabla 3.22. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Conservación	76
Tabla 3.23. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Ganadero.....	76
Tabla 3.24. Correspondencia entre niveles de aptitud y capacidad de acogida derivado de la aplicación de la ecuación 3.5.....	77
Tabla 3.25. Superficies en ha para cada nivel de aptitud de los usos considerados.	84
Tabla 3.26. Superficies en ha y % para usos múltiples: “A”- agricultura, “F” – aprovechamiento forestal del bosque nativo, “E”– ecoturismo, “C”- conservación y “G”- ganadería. “NA”- no apto.	85
Tabla 3.27. Superficies en ha de áreas aptas para uso único, usos complementarios y usos en conflicto.....	87
Tabla 4.1. Valoración del coeficiente Kappa (Landis y Koch, 1977)	97
Tabla 4.2.a. Pesos de los factores de evaluación de CAU para agricultura derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D2, D3, D4) y razón de consistencia de la matriz.	99
Tabla 4.2.b. Pesos de los factores de evaluación de CAU para aprovechamiento forestal del bosque nativo derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D3, D4) y razón de consistencia de la matriz.	99
Tabla 4.2.c. Pesos de los factores de evaluación de CAU para ecoturismo derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D2, D4) y razón de consistencia de la matriz.	100

Tabla 4.2.d. Pesos de los factores de evaluación de CAU para conservación derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D2, D4) y razón de consistencia de la matriz.	100
Tabla 4.2.e. Pesos de los factores de evaluación de CAU para ganadería derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D2, D3) y razón de consistencia de la matriz.	100
Tabla 4.3. Pesos de orden y los correspondientes métodos de combinación para diferentes valores de ORness (o parámetros α)	104
Tabla 4.4. Tamaño de las muestras de pesos para los usos evaluados en base a la cantidad de factores considerados	106
Tabla 4.5. Categorización de regiones de aptitud en base a umbrales de aptitud media y desvío estándar. Cuadrante I (áreas robustas) y Cuadrante II (áreas candidatas).....	107
Tabla 4.6. Coeficientes Kappa calculados a partir de los mapas de niveles de aptitud obtenidos de la utilización de ponderaciones de diferentes decisores con respecto al mapa de nivel de aptitud tomado como referencia. R significa que las ponderaciones del decisor fueron tomadas como referencia.....	108
Tabla A.1. Unidades cartográficas de suelos (grandes grupos de los suelos dominantes) reclasificadas <i>ad hoc</i> en función de la aptitud para uso agropecuario más frecuente de los suelos pertenecientes a ese gran grupo.	151
Tabla A.2. Condiciones demográficas de la Población.....	152
Tabla A.3. Condiciones de habitabilidad.	152
Tabla A.4. Distribución en zonas urbanas y rurales.....	152
Tabla A.5. Condiciones educacionales.	152
Tabla A.6. Régimen de tenencia de la vivienda.....	153
Tabla A.7. Infraestructura de servicios.	153
Tabla A.8. Calidad constructiva de la vivienda y calidad de conexión a servicios.....	153
Tabla A.9. Necesidades Básicas Insatisfechas.	154
Tabla A10. Expertos consultados: formación, especialidad, temas en los que hicieron aportes técnicos en el desarrollo de este trabajo. D1, D2, D3 Y D4 completaron la matriz de comparación para determinar los pesos de los criterios de todos los usos considerados.....	154
Tabla A11. Datos geográficos utilizados en la zonificación Biofísica, Socio-económica y Político-institucional del NOA.....	156
Tabla A12. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida de uso agrícola.....	157
Tabla A13. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida de uso aprovechamiento forestal del bosque nativo.	158
Tabla A14. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida para el Ecoturismo.	159
Tabla A15. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida para la Conservación.....	161

Tabla A16. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida para la Ganadería extensiva.....	163
---	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio: el Noroeste Argentino.	9
Figura 2.1. Esquema metodológico para obtener la zonificación Biofísica, Socio-económica y Político-institucional	24
Figura 2.2. Esquema del proceso de ACP y análisis cluster. a) Grilla asociada al área de estudio con su tabla de atributos. Cada fila se corresponde a una celda y cada columna muestra los valores estandarizados de las variables seleccionadas. b) los factores 1, 2 y 3 derivados del ACP, c) imagen compuesta por tres bandas (factor1, factor 2 y factor 3) y clase resultante del análisis cluster.....	28
Figura 2.3. Esquema metodológico ilustrativo del análisis de encadenamiento utilizado para obtener la zonificación socio-habitacional. UE significa unidades espaciales.	31
Figura 2.4. Zonificación bioclimática del NOA obtenida a partir de variables bioclimáticas de WorldClim. Las zonas 1 a 5 representan zonas bioclimáticas homogéneas en términos de las variables bioclimáticas de Worldclim.....	34
Figura 2.5. Pendientes expresadas en porcentajes, reclasificadas en 4 categorías (Adaptado de FAO, 2009): 3.Tierras a nivel (pendientes menores a 5%), 2.Tierras de pendiente ligera (pendientes entre 5 y 10%), 1.Tierras con pendiente moderada (pendientes entre 10 y 30%) y 0.Tierras escarpadas (pendientes mayores a 30%).....	36
Figura 2.6. Unidades cartográficas de suelos reclasificadas según sus suelos dominantes en 3 categorías: 0.No apto, 1.Moderadamente apto y 2.Apto.....	36
Figura 2.7. Zonas biofísicas derivadas de la superposición de las zonas bioclimáticas (Figura 2.3), mapa de pendientes recategorizadas (Figura 2.4) y unidades cartográficas de suelos reclasificada (Figura 2.5).	37
Figura 2.8. Regiones socio-habitacionales obtenidas a través de procedimiento de análisis de encadenamiento. Las regiones 1 a 6 representan zonas homogéneas en términos de condiciones socio-habitacionales de la población.....	38
Figura 2.9. Índice de suficiencia ferroviaria clasificado en tres categorías: Baja, Media, Adecuada	40
Figura 2.10. Índice de Distribución espacial de los asentamientos de la población (Índice de Clark- Evans): Concentrada, aleatoria, regular u homogénea. Los puntos muestran la ubicación de los asentamientos considerados.....	41
Figura 2.11. Zonas socio-económicas derivadas de la superposición de las regiones socio-habitacionales (Figura 2.8), mapa de suficiencia ferroviaria (Figura 2.9) y mapa de distribución espacial de los asentamientos de la población (Figura 2.10). “NBI” significa necesidades básicas insatisfechas, “sf” significa suficiencia ferroviaria, “dist pob” significa distribución de la población.....	42
Figura 2.12. Zonificación político-institucional	42
Figura 2.13. Superficies de zonas bioclimáticas por provincias (en hectáreas).....	43
Figura 2.14. Superficies de suelos según aptitud para uso agropecuario más frecuente del suelo dominante del Gran Grupo por provincias (en hectáreas)	44
Figura 2.15. Superficies de suelos, según sus pendientes por provincias (en hectáreas).....	44

Figura 2.16. Cantidad de departamentos por provincias, categorizados según el índice de suficiencia ferroviaria.	46
Figura 2.17. Cantidad de departamentos por provincias, categorizados según la distribución espacial de la población.	46
Figura 3.1. Ubicación del Departamento Anta, red vial y ferroviaria, localidades importantes y áreas protegidas superpuestas en una imagen satelital Landsat 8 OLI.	56
Figura 3.2. Función de pertenencia asociada a la variable Índice de Productividad de los suelos según la visión de la lógica difusa (a) y según la visión de la lógica clásica (b).	58
Figura 3.3. Estructura esquemática de un proceso de Evaluación multicriterio (EMC) basado en Sistema de Información Geográfica (SIG) para un uso de suelo. CAU significa capacidad de acogida de uso. Los colores graduados (oscuros a claros) muestran la valoración de las alternativas, según el criterio para ese uso, desde la mejor (más oscuro) a la peor (más claro)..	59
Figura 3.4. Diagrama esquemático para modelar evaluación capacidad de acogida para diferentes usos (CAU), adaptado de Bunruamkaew y Murayama, 2011.	60
Figura 3.5. Funciones de pertenencia difusa lineales	70
Figura 3.6. Funciones de pertenencia difusa Sigmoides.....	70
Figura 3.7. Funciones de pertenencia difusa en forma de J	71
Figura 3.8. Funciones de pertenencia difusa para reescalar factores compuestos	71
Figura 3.9. Escala de comparación por pares de AHP (Saaty y Vargas, 1991).....	73
Figura 3.10. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para uso agrícola.....	82
Figura 3.11. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para aprovechamiento forestal del bosque nativo.....	82
Figura 3.12. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para ecoturismo.	83
Figura 3.13. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para conservación.	83
Figura 3.14. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para ganadería.	84
Figura 3.15. Aptitud para usos múltiples. La aptitud para los usos fue referenciada como “A”- agricultura, “F” – aprovechamiento forestal del bosque nativo, “E”– ecoturismo, “C”- conservación y “G”- ganadería. “NA”- no apto	85
Figura 4.1. Esquema metodológico de análisis de sensibilidad e incertidumbre de un modelo de CAU de 5 factores, abordado en 2 etapas (1- Ejercicios de simulación, 2-Análisis de sensibilidad e incertidumbre integrados) En borde amarillo se muestra la componente sometida a evaluación, DR significa decisor de referencia (ponderaciones utilizadas en el capítulo III). EO significa extremadamente optimista, MO muy optimista, O optimista, N neutral, P pesimista, MP muy pesimista, EP extremadamente pesimista.	98
Figura 4.2. Algoritmo para cuantificar las variaciones de los resultados de capacidad de acogida para los diferentes usos de acuerdo a diferentes ponderaciones derivadas de perspectivas diferentes de los decisores. Los rectángulos representan procesos, el lazo del rombo incluye procesos que se repiten para cada decisor. Luego de aplicar el método para todos los decisores, se comparan los resultados.	101

Figura 4.3. Algoritmo para cuantificar las variaciones de los resultados de capacidad de acogida para los diferentes usos de acuerdo a la cantidad de criterios considerados en el modelo de decisión. Los rectángulos representan procesos, el lazo del rombo incluye procesos que se repiten mientras queden más de 2 criterios. Luego de aplicar el método para todos los subconjuntos de criterios, se comparan los resultados.....	102
Figura 4.4. Método OWA: espacio de decisión en función del riesgo y la compensación asumidos. Fuente Eastman, 2003.....	104
Figura 4.5. Metodología de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícita.	105
Figura 4.6. Mapas de incertidumbre media cuadrática (IMC) derivados de la utilización de diferentes ponderaciones para cada uso de suelo: a) agricultura, b) aprovechamiento forestal del bosque nativo, c) ecoturismo d) conservación y e) ganadería.	109
Figura 4.7. Coeficientes Kappa calculados a partir de los mapas de niveles de aptitud obtenidos de la extracción de criterios con respecto al mapa de nivel de aptitud tomado como referencia.	110
Figura 4.8. Mapas de incertidumbre media cuadrática (IMC) derivados de la extracción de criterios para cada uso de suelo: a) agricultura, b) aprovechamiento forestal del bosque nativo, c) ecoturismo d) conservación y e) ganadería.....	112
Figura 4.9. Mapas de niveles de aptitud obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación, ED significa estrategia de decisión, A - agricultura, F - aprovechamiento forestal del bosque nativo, E - ecoturismo, C – conservación, G- ganadería.	119
Figura 4.10.a. Superficies de niveles de aptitud (%) para uso agrícola obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORNess). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.	119
Figura 4.10.b. Superficies de niveles de aptitud (%) para aprovechamiento forestal del bosque nativo obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORNess). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.	120
Figura 4.10.c. Superficies de niveles de aptitud (%) para conservación obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORNess). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.	120
Figura 4.10.d. Superficies de niveles de aptitud (%) para ecoturismo obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORNess). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.	121
Figura 4.10.e. Superficies de niveles de aptitud (%) para ganadería obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORNess). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.	121
Figura 4.11. Categorización de regiones de aptitud en base a umbrales de aptitud media y desvío estándar.....	123
Figura 4.12.a. Índices de primer orden (S1 a S5) e índices de efecto total (ST1 a ST5) para el uso agrícola. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.....	123

Figura 4.12.b. Índices de primer orden (S1 a S5) e índices de efecto total (ST1 a ST5) para aprovechamiento forestal del bosque nativo. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.....	124
Figura 4.12.c. Índices de primer orden (S1 a S8) e índices de efecto total (ST1 a ST8) para ecoturismo. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.	124
Figura 4.12.d. Índices de primer orden (S1 a S11) e índices de efecto total (ST1 a ST11) para conservación. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.....	124
Figura 4.12.e. Índices de primer orden (S1 a S8) e índices de efecto total (ST1 a ST8) para ganadería. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.	125
Figura 5.1. Ordenamiento territorial en el Municipio. Una guía metodológica. Fuente: Méndez Casariego y Pascale Medina, 2014. POT significa Plan de Ordenamiento Territorial.....	135
Figura 5.2. Mapas de relación uso actual/aptitud teniendo en cuenta las áreas robustas, candidatas y no aptas derivadas del análisis de incertidumbre.....	141
Figura A1. Hoja de cálculo proporcionada a los expertos para calcular los pesos de los factores considerados para evaluar la capacidad de acogida para los distintos usos.....	155
Figura B1. Interfaz de QGIS para ejecutar el Plugin SADEOT	167
Figura B2. Interfaz del proceso de zonificación bioclimática.	168
Figura B3. Estadísticos derivados del Análisis de Componentes Principales y del Análisis Cluster.	168
Figura B4. Interfaz del proceso de zonificación socio-económica.....	169
Figura B5. Valores medios de las variables socio- económicas consideradas.	169
Figura B6. Interfaz del proceso de estandarización simple.	170
Figura B7. Interfaz del proceso de estandarización difusa.	171
Figura B8: Selección de los factores estandarizados.....	171
Figura B9: Interfaz de carga de matriz de comparación por pares y cálculo de indicadores de consistencia.....	172
Figura B10. Selección de las restricciones.	172
Figura B11: Selección de los factores estandarizados.....	173
Figura B12. Selección de las restricciones.	173
Figura B13: Interfaz de carga de los pesos.....	174
Figura B14. Selección de los factores estandarizados.....	175
Figura B15. Interfaz de carga de la matriz de comparación por pares, cuadro de selección de factores.	175
Figura B16. Selección de las restricciones.	176
Figura B17. Selección de los factores estandarizados.....	177
Figura B18. Selección de las restricciones.	177
Figura B19. Especificación del número de muestras.....	178

Figura B20. Especificación de los raster a partir de los cuales se cuantificarán los cambios... 178	178
Figura B21. Cuantificación de cambios entre mapas de capacidad de acogida de uso..... 179	179
Figura B22. Interfaz de cálculo de porcentajes de exactitud y coeficiente Kappa..... 180	180

ABREVIATURAS

AHP: proceso de jerarquías analíticas (por sus siglas en inglés, Analytical Hierarchy Process)

AI: análisis de incertidumbre

AS: análisis de sensibilidad

CAU: capacidad de acogida para un uso

CI: índice de consistencia (por sus siglas en inglés, Consistency Index)

CR: razón de consistencia (por sus siglas en inglés, Consistency Ratio)

EMC: técnicas de evaluación multicriterio

IMC: incertidumbre media cuadrática

NOA: Noroeste Argentino

OAT: un factor a la vez (por sus siglas en inglés, One-Factor-At-A-Time)

OWA: promedio ponderado ordenado (por sus siglas en inglés, Ordered Weighted Average)

OT: ordenamiento territorial

OTBN: ordenamiento territorial de los bosques nativos

POT: plan de ordenamiento territorial

RI: índice aleatorio (por sus siglas en inglés, Random Index)

SADEOT: Sistema de Ayuda a la decisión Espacial para el Ordenamiento Territorial

SE: servicios ecosistémicos

SIG: Sistema de Información Geográfica

TUTs: tipos de usos de la tierra

UBAs: unidades básicas de análisis

UE: unidades espaciales

WLC: sumatoria lineal ponderada, (por sus siglas en inglés Weighted Linear Combination)

Título: Técnicas de evaluación multicriterio, lógica difusa y Sistemas de Información Geográfica como herramientas para el ordenamiento territorial

Resumen

En las últimas décadas el Noroeste Argentino ha experimentado un proceso de expansión de la frontera agropecuaria. Los problemas que han surgido como consecuencia de este proceso, podrían asociarse a la inexistencia de políticas claras en relación al ordenamiento territorial del espacio rural. La necesidad de fortalecer y generar políticas de estado que contribuyan al desarrollo de los territorios es hoy una tarea prioritaria en la que están involucrados los diferentes sectores de la sociedad, los cuales comparten responsabilidades comunes, aunque perspectivas e intereses diferenciados. En la presente tesis, se evaluaron diferentes herramientas y metodologías que sirven de apoyo a la toma de decisiones en la planificación del uso de la tierra en el Noroeste Argentino.

Se obtuvo una regionalización biofísica, socio-económica, político-institucional del territorio: 10 regiones biofísicas diferenciadas por condiciones climáticas, suelos y pendientes; 24 regiones socioeconómicas basadas en las condiciones de vida de la población, su distribución y suficiencia ferroviaria y 145 regiones político institucionales derivadas a partir de 99 departamentos y de 46 áreas de uso restringido.

Se estimó la capacidad de acogida del departamento Anta, en la provincia de Salta, para distintos usos (agricultura, aprovechamiento forestal del bosque nativo, ecoturismo, conservación y ganadería extensiva) utilizando técnicas de evaluación multicriterio (EMC) basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y lógica difusa. Se obtuvieron mapas de aptitud para los distintos usos y un mapa de aptitud para usos múltiples, del cual se cuantificaron las áreas de usos complementarios (que se pueden integrar en una misma unidad), o posibles usos en conflicto (especialmente excluyentes).

Un análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito sobre las ponderaciones de la EMC identificó regiones críticas de aptitud, siendo de especial interés aquellas con aptitud media alta y desvío estándar bajo (regiones robustas) y las de aptitud media alta y desvío estándar alto (áreas candidatas). Las zonas de alta aptitud para aprovechamiento forestal de bosques nativos, ecoturismo, conservación y ganadería extensiva tuvieron un desvío estándar menor al 10%, es decir baja incertidumbre. La agricultura, mostró un desvío estándar mayor al 10% (incertidumbre alta) en casi la totalidad de las áreas de alta aptitud media.

Los índices de sensibilidad muestran que los pesos que recogen una cantidad importante de variabilidad en los modelos (“dominantes”) están asociados al índice de productividad (0,21), a la disponibilidad de riego (0,26), a la pendiente (0,25) para el uso agrícola; a la productividad primaria neta (0,5), la pendiente (0,21) y la altitud (0,18) para el aprovechamiento forestal del bosque nativo; a la pendiente (0,27) y la distancia desde centros poblados (0,17) para el ecoturismo; a la pendiente (0,23) y la heterogeneidad del paisaje (0,16) para conservación y por último a las áreas de sobreuso (0,25) y a la distancia a cuerpos de agua y cursos de agua (0,22) para la ganadería extensiva.

Se desarrolló un Sistema de Ayuda a la decisión Espacial para el Ordenamiento Territorial (SADEOT) que incorpora los procesos de análisis desarrollados en esta tesis en las diferentes etapas contempladas en la metodología. El SADE se implementó en

software libre para facilitar su distribución y uso por parte de los actores involucrados en la toma de decisiones.

Palabras clave: Noroeste Argentino, Ordenamiento Territorial, Técnicas de Evaluación Multicriterio, Sistema de Información Geográfica, Análisis de Sensibilidad e Incertidumbre, Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial

Title: Multi-criteria evaluation techniques, fuzzy logic and GIS as tools for land use planning

Abstract

In recent decades the Argentine Northwest like other rural areas of South America has undergone a process of expansion of the agricultural frontier. The problems that have arisen as a result of this process, may be associated with the absence of clear policies in relation to land use planning of rural areas. The need to generate and strengthen state policies that contribute to the development of territories is a priority involving different sectors of society, which share common responsibilities, albeit with different perspectives and interests. In this thesis, different tools and methodologies to support the decision making processes in land use planning in the Argentine Northwest.

Biophysical, socio-economic, political-institutional regionalizations of territory were obtained: 10 biophysical regions differentiated by climatic conditions, soils and slopes; 24 socio-economic regions based on the living conditions of the population, its distribution and railway sufficiency, and 145 political institutional regions derived from 99 departments and 46 areas of restricted use.

The aptitude for different uses (agriculture, logging of native forests, ecotourism, conservation and ranching) was estimated using multi-criteria evaluation techniques (EMC) based Geographic Information Systems (GIS) and fuzzy logic. Aptitude maps were obtained for the different uses and a map of aptitude for multiple uses, from which the areas of complementary uses (that can be integrated in the same unit), or possible conflicting uses (spatially excluding) were quantified.

An analysis of spatially explicit sensitivity and uncertainty on the weights of the EMC allowed the identification of critical regions of aptitude, being of special interest those with high average fitness and low standard deviation (robust regions) and those of high average fitness and high standard deviation (areas candidates). Areas of high fitness for logging of native forests, ecotourism, conservation and ranching had, in general, a standard deviation of less than 10%, that is, low uncertainty. In the case of agriculture, the standard deviation, in almost all areas of high fitness, was greater than 10% (high uncertainty).

The sensitivity indexes show that the dominant weights (that collect a significant amount of variability in the models) are associated to the factors: productivity index (0.21), irrigation availability (0.26), slope (0.25) for agricultural use; net primary productivity (0.5), slope (0.21) and altitude (0.18) for logging of native forests; slope (0.27) and distance from population centers (0.17) for ecotourism, slope (0.23) and landscape heterogeneity (0.16) for conservation and, areas of overuse (0.25) and distance to bodies of water and water courses (0.22) for ranching.

A Spatial Decision Support Systems (SADEOT) was developed for land use planning, incorporating the processes of analysis used in this thesis in the various stages in the methodology. The system was implemented in free software for easy distribution and use by the actors involved in decision-making.

Keywords: Argentine Northwest, Land Management, Multi-Criteria Evaluation Techniques, Geographic Information System, Sensitivity and Uncertainty Analysis, System Spatial Decision Support.

1.1. Marco teórico

1.1.1 El ordenamiento territorial del Noroeste Argentino

En las últimas décadas el Noroeste Argentino (NOA) al igual que otras zonas rurales de Sudamérica ha experimentado un proceso de expansión de la frontera agropecuaria. Éste ha resultado en un incremento de la tasa de deforestación, la intensificación de los conflictos por la tenencia de la tierra, el desplazamiento de la agricultura de subsistencia hacia tierras marginales, el abandono de puestos por parte de pobladores rurales y la migración hacia zonas urbanas, la fragmentación del paisaje y la alteración y simplificación de la estructura y las funciones del ecosistema.

Los problemas que han surgido como consecuencia de estos cambios, podrían asociarse a la inexistencia de políticas claras en relación al ordenamiento territorial del espacio rural. La necesidad de fortalecer y generar políticas de estado que contribuyan al desarrollo de los territorios es hoy una tarea prioritaria en la que están involucrados los diferentes sectores de la sociedad, los cuales comparten responsabilidades comunes, aunque perspectivas e intereses diferenciados (Paruelo et al., 2014).

Al respecto, el Senado y la Cámara de Diputados de la Nación sancionaron en 2009 la Ley 26.331 de Presupuestos Mínimos de Protección ambiental de los Bosques Nativos, lo que impulsó a varias provincias a elaborar planes de Ordenamiento Territorial (OT). Este proceso fue abordado por las provincias de diferentes maneras, lo que ha originado dificultades a la hora de unificar criterios. Estas dificultades se asocian a algunos de los siguientes aspectos:

- Diferentes enfoques: por ejemplo aquellos planes de ordenamiento que contemplan solo el bosque en contraposición a los que contemplan un ordenamiento integral del territorio.
- Limitaciones en cuanto a la disponibilidad de la información básica necesaria para obtener los criterios de sustentabilidad ambiental sugeridos para la definición de las categorías de conservación de acuerdo a la Ley 26331, el desconocimiento de las fuentes o de la calidad de los mismos.
- La simplificación excesiva de los criterios de zonificación sin contemplar la multidimensionalidad (ambiental, económica y socio-cultural) del ordenamiento territorial.
- La dificultad de consensuar los criterios a tener en cuenta, dada la variedad de perspectivas e intereses de los actores implicados (productores, comunidades locales, grupos ambientalistas, etc.).
- La ausencia de parámetros comunes de evaluación, y de herramientas adecuadas.

Las provincias del NOA elaboraron diferentes versiones de ordenamiento territorial de sus bosques nativos para adaptarse a los presupuestos mínimos establecidos en la Ley 26331 (Tabla 1.1; Griffiths, 2014)

Tabla 1.1. Normativas de aprobación del Ordenamiento Territorial de los Bosques Nativos en la región NOA.

Provincia	Acto administrativo	Fecha de sanción
Salta	Ley provincial N° 7543	16/12/2008
Santiago del Estero	Ley provincial N° 6942	17/03/2009
Tucumán	Ley provincial N° 8304	24/06/2010
Catamarca	Ley provincial N° 5311	09/09/2010
Jujuy	Ley provincial N° 5676	14/04/2011

Para elaborar las propuestas de OT de bosques nativos, la Ley establece 10 criterios de sustentabilidad ambiental a considerar: C1. Superficie, C2. Vinculación con otras comunidades naturales (no boscosas), C3. Vinculación con áreas protegidas e integración regional, C4. Existencia de valores biológicos sobresalientes, C5. Conectividad entre ecorregiones, C6. Estado de conservación, C7. Potencial forestal, C8. Potencial de sustentabilidad agrícola, C9. Potencial de conservación de cuencas y C10. Valor que las Comunidades Indígenas y campesinas dan a los bosques nativos.

García Collazo y Paruelo (2014) mostraron que existe una gran disparidad en la interpretación de los criterios de sustentabilidad ambiental por parte de las leyes provinciales, contrastantes calidades técnicas y, que pocas han explicitado la metodología empleada. Como resultado se observa que el nivel de coherencia entre las categorías de conservación de las jurisdicciones que comparten ecorregiones es bajo, existiendo varias zonas donde las categorías de conservación cambian abruptamente.

Para consensuar y unificar conceptos y criterios, un equipo interinstitucional delineó las bases para el ordenamiento del territorio rural argentino (Paruelo et al., 2014). En este documento se sostiene que el ordenamiento del territorio y la conservación de los recursos naturales destinados a la producción, son tareas indelegables del Estado. Este debería generar políticas activas, donde la toma de decisiones este acompañada por una participación comprometida de los diferentes sectores (Paruelo et al., 2014). Como todo proceso de toma de decisiones, el ordenamiento territorial debería incorporar elementos de diagnóstico de la situación actual, implementarse a través de un proceso participativo que incluya a todos los actores implicados y considerar como aspecto esencial el carácter prospectivo de las propuestas, expresadas como escenarios futuros posibles.

Un ejemplo de un proceso de OT en Argentina, que sigue algunos lineamientos establecidos en este documento es el proyecto piloto interdisciplinario e interinstitucional de Ordenamiento Territorial de Tupungato (Fernández y Pizzolato, 2014). En la provincia de Mendoza a partir de la sanción de la Ley N° 8051 en mayo de 2009, todos los municipios están obligados a realizar los planes de ordenamiento territorial. En ese contexto, se desarrolló este proyecto, en donde la municipalidad es objeto y sujeto de la construcción de uno de los instrumentos que la Ley exige realizar.

El proceso ha seguido cuatro grandes etapas: 1. acuerdos políticos-institucionales; 2. elaboración del diagnóstico territorial, subdividido en: a) análisis territorial que se sustenta en los datos cuantitativos, información estadística la cual se somete a procedimientos matemáticos y b) talleres participativos para relevar información cualitativa, la percepción de los actores y agentes del territorio; 3. construcción de escenarios futuros y 4. la planificación.

Otro aspecto a resaltar en este proyecto es la multidimensionalidad del análisis territorial: contempló el análisis del medio físico, de actividades y agentes, de los espacios adaptados, del marco legal e institucional y de los valores.

1.1.2. Herramientas para el ordenamiento territorial

Para apoyar a la toma de decisiones en el proceso de ordenamiento territorial se han propuesto herramientas y metodologías que contemplan las diferentes etapas del proceso, haciendo uso de diversas técnicas, las cuales son apropiadas para diferentes escalas espaciales. Algunas aplicaciones solamente evalúan la aptitud de las tierras para determinados usos, como es el caso de ALES (Rossiter, 1990) y ArcViewLESA (Day et al., 2000) y el software comercial de SIG IDRISI (Eastman et al., 1995) el cual incluye herramientas para la evaluación y asignación de usos de la tierra.

Algunos autores han intentado abordar el proceso en su totalidad como es el caso de Matthews et al. (1999) a través de un sistema denominado LADDS (por sus siglas en inglés, “Sistema de soporte a las decisiones para la asignación de tierras”) el cual incluye etapas de evaluación de tierras, asignación espacial de su uso y la evaluación de impacto ambiental. Herrmann y Osinski (1999) proponen un enfoque holístico que combina diferentes escalas espaciales (nacional, regional y local) utilizando un sistema de información geográfica (SIG) y herramientas de modelación. En el año 2000, FAO desarrolló la metodología SIRTPLAN que incorpora SIG, evaluación de tierras y técnicas de generación de escenarios a través de la utilización de un grupo de programas independientes en cada etapa del proceso de planificación. Hawkins y Selman (2002) presentaron un enfoque para la planificación del uso de la tierra a escala subregional basado en modelos alternativos de planificación del paisaje. Del mismo modo Santé-Riveira et al. (2008) propuso el sistema denominado RULES (por sus siglas en inglés “Sistema de Exploración de usos de tierras rurales”) basado en un SIG que soporta las tres etapas básicas en la planificación de uso de las tierras rurales: la evaluación de la aptitud, la optimización de los usos de la tierra y la asignación espacial de los mismos.

En años recientes se ha avanzado en la aplicación del análisis multicriterio para abordar la multidimensionalidad de la toma de decisiones respecto de la planificación urbana y rural. El análisis multicriterio se focaliza en proveer la teoría y las metodologías necesarias para soportar la toma de decisiones en problemas complejos y poco estructurados y donde los actores implicados presentan múltiples puntos de vista y criterios (Zopounidis y Parpalos, 2010). Las técnicas de evaluación multicriterio (EMC) han sido aplicadas en diferentes procesos de planificación y a diferentes escalas: la localización de rellenos sanitarios (Frau et al., 2006), la ubicación del nuevo aeropuerto de la ciudad de México (Bojórquez Tapia et al., 2005), la planificación y gestión ambiental (Lahdelma et al., 2000), la clasificación de cuencas hidrográficas del NOA de acuerdo a peligros hidrogeológicos (Gaviño Novillo y Sarandón, 2002), la ordenación y conservación de los recursos naturales para la determinación de futuros espacios protegidos en Madrid (Vía y Muñoz, 2006), la planificación de usos de la tierra en áreas costeras considerando criterios sociales, ambientales y económicos bajo diferentes escenarios (Pourebrahim et al., 2011).

La toma de decisiones respecto de la planificación de los usos de la tierra debe ser abordada en situaciones en las que en general la información es incompleta o imprecisa, es brindada y utilizada por múltiples actores que pueden tener dificultades o ser reticentes a proveer un juicio numérico preciso con respecto a los criterios de evaluación (Borouhaki y Malczewski, 2010). Estas razones han motivado a diferentes

autores a proponer el uso de la teoría de conjuntos difusos y la lógica difusa (Zadeh, 1965) en problemas que involucren evaluación y planificación del territorio. La lógica difusa provee un medio para manejar la ambigüedad y la incertidumbre y permite generar clasificaciones continuas más realistas (Burrough et al., 1992; Zhang et al., 2004; Chen y Paydar, 2012). Andriantiatsaholiniaina et al. (2004) incorporó la lógica difusa en un modelo de evaluación de sustentabilidad denominado SAFE (“Sustainability Assessment by Fuzzy Evaluation”, Phillis y Andriantiatsaholiniaina 2001). Boroushaki y Malczeuski (2010) propusieron utilizar el enfoque de mayoría difusa (“fuzzy majority”) para la toma de decisiones grupales respecto a la evaluación de aptitud de tierras, utilizando técnicas de EMC basadas en SIG. Hall y Arnberg (2002) desarrollaron un método de regionalización basado en funciones de pertenencia difusas que puede ser usado en el análisis y la planificación del paisaje, entre otros.

Para buscar soluciones óptimas a problemas de asignación de usos de la tierra con objetivos múltiples, algunos autores exploraron y demostraron la utilidad de diferentes herramientas y enfoques. Stewart et al. (2004) y Janssen et al. (2008) utilizaron técnicas de optimización multiobjetivo. Otros autores incorporaron algoritmos genéticos (AG, Matthews et al., 1999; Schweitzer, 2011; Kai et al., 2012; Stewart y Janssen, 2014). Holzkämper y Seppelt (2007) también usaron AG considerando en la asignación las dependencias de la vecindad, los flujos laterales y los patrones del paisaje. En otros trabajos se incorpora la lógica difusa en la modelización del problema (Deep et al., 2011) o en su sistema de inferencia (Liu et al., 2013).

Munda (2004) propuso el concepto de EMC social como un enfoque útil para la aplicación de la elección social con el fin de abordar los problemas en donde los hechos son inciertos, hay conflicto de valores, lo que se está poniendo en juego es muy importante y, por lo tanto, las decisiones a tomar son urgentes (Funtowicz y Ravetz, 1993). Este enfoque reconoce que: a) El uso de la evaluación multicriterio es una herramienta muy eficiente para implementar un enfoque multi e interdisciplinario. b) La aplicación de la ciencia para la política implica una responsabilidad de los científicos hacia la sociedad entera y no solo hacia los tomadores de decisiones. c) La participación pública es un componente necesario pero no suficiente y se requiere de la participación técnica para mejorar el conocimiento del problema. d) Los juicios éticos son una componente inevitable del ejercicio de evaluación e influyen fuertemente en los resultados, por lo que, la transparencia en los supuestos usados es esencial. e) En este marco, las convenciones de agregación matemática juegan un rol importante, para asegurar, por ejemplo que el ranking obtenido sea consistente con la información y los supuestos usados.

El enfoque de planificación del territorio participativo, involucra múltiples actores, con diferentes valoraciones y prioridades para los usos del territorio (Román, 2014) y plantea la necesidad de desarrollar un número de escenarios alternativos (Gavier Pizarro et al., 2014). Se entiende por escenario a la combinación de actividades o usos posibles de un territorio en un momento particular (Román, 2014). Mahmoud et al. (2009) sostienen que los escenarios, permiten visualizar los resultados de diferentes políticas o planes, evaluar sus efectos o impactos potenciales (por ejemplo problemas/conflictos sociales o ambientales) e implementar medidas anticipatorias (por ejemplo direccionar el sistema hacia el escenario de menor impacto o más aceptable para los objetivos de las comunidades involucradas).

En este sentido, el enfoque de servicios ecosistémicos (SE) definidos como los componentes o aspectos de los ecosistemas utilizados (activa o pasivamente) para producir el bienestar humano (Fisher et al., 2009) brinda una base nueva y promisoría para encarar la evaluación ambiental del OT a través del análisis de aquellos SE que se pierden o que son afectados por la intervención humana (Barral y Maceira, 2011). Fisher et al. (2009) propusieron un esquema de clasificación de SE en donde se considera a la estructura y al funcionamiento del ecosistema como "SE Intermedios", que a su vez determinan "SE Finales". Varios "SE Intermedios" (por ejemplo, la producción primaria o la composición de especies) pueden determinar el nivel de provisión de "Servicios Finales", tales como, producción de forraje o el secuestro de carbono. Viglizzo et al. (2011) propusieron un conjunto de funciones de producción para cuantificar de forma relativa los SE de una región.

Un plan de OT implica cambios en los usos del suelo, cambios que pueden tener diversos tipos de consecuencias, relacionadas con los SE finales (Fisher et al., 2009). Volante et al. (2012) cuantificaron el impacto de los desmontes sobre un SE intermedio clave, la productividad primaria neta (PPN) y concluyen que si bien ha ocurrido un cambio relativamente pequeño en la PPN total anual, las parcelas cultivadas mostraron una estacionalidad mucho mayor que la de la vegetación natural reemplazada, lo cual se asocia con una reducción de la actividad fotosintética durante el periodo de barbecho. Se pueden esperar otras consecuencias sobre SE como control de erosión y la regulación del agua, debido a una mayor exposición del suelo desudo, pérdida o deterioro de la calidad del hábitat, disminución de la disponibilidad de la biomasa verde para los consumidores primarios durante el barbecho, entre otras.

La asignación de usos de la tierra es un proceso que involucra determinar qué hacer, cuánto hacer y donde hacer, lo cual implica la necesidad de una optimización espacial (Kai et al., 2012). Este aspecto es abordado por la mayoría de los autores antes mencionados a través la utilización de SIG. Los SIGs facilitan la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados y permiten resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA, 1990) y por tanto aportan una visión espacial al problema de la toma decisiones (CIAT, 2001).

Los antecedentes mencionados sugieren aspectos a tener en cuenta en el proceso de OT, tales como el nivel de servicios ecosistémicos, la planificación participativa del territorio o, se focalizan en generar herramientas útiles en algunas de las etapas del OT. En cambio otros persiguen objetivos específicos (planificar un uso de suelo o evaluar la sustentabilidad) o utilizan una técnica EMC específica.

El objetivo de esta tesis es integrar herramientas que faciliten los procesos técnicos involucrados en las diferentes etapas del OT participativo, que dé transparencia al proceso, que se pueda adaptar a las distintas escalas de abordaje, que permita comparar resultados a partir de diferentes modelos y posibilite a los actores aportar información en base a su experiencia y conocimientos para generar reglas de decisión. Además propone una metodología que para el diagnóstico y la propuesta de escenarios de uso de suelos consensuados entre los actores a partir del conocimiento del grado de riesgo que se asume con tales decisiones.

1.1.3. Análisis de sensibilidad e incertidumbre

La evaluación de la aptitud de las tierras es un paso importante en la planificación del uso de la tierra (Xu y Zhang, 2013). Desde un punto de vista metodológico, la utilización de técnicas de EMC basadas en SIG, han sido particularmente eficientes para la asignación óptima de usos de la tierra (Orán Cáceres et al., 2010; Rocha et al., 2010; Chen et al., 2010). Sin embargo, las técnicas EMC basadas en SIG son procesos multidisciplinarios y de varias etapas y que poseen por lo tanto muchas fuentes de incertidumbre: la selección de criterios, la precisión de los datos de entrada, los métodos de estandarización, los pesos o ponderaciones de los criterios y los métodos de agregación (Burgman, 2005; Chen et al., 2010).

El análisis de incertidumbre (AI) cuantifica la variabilidad de los resultados dada la incertidumbre de las entradas del modelo, mientras que el análisis de sensibilidad (AS) subdivide esta variabilidad y la adjudica a la incertidumbre de las entradas (Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2014, Feizizadeh et al., 2014). Conceptualmente los análisis de sensibilidad e incertidumbre representan dos enfoques complementarios para cuantificar el efecto de las distintas fuentes de incertidumbre en los resultados del modelo (Tenerelli y Carver, 2012). Los análisis de incertidumbre y sensibilidad son fundamentales para mejorar la robustez y credibilidad de los resultados (Rocha et al., 2010). Por otro lado resultan de utilidad para la validación y la calibración de los modelos de decisión multicriterio (Delgado y Bosque Sendra, 2004; Zoras et al., 2007; Xu y Zhang, 2013)

Orán Cáceres et al. (2010) utilizaron AS para determinar si la representación de los criterios implicados en el modelo de EMC puede influir de manera sustancial en la variación de los resultados. Chen et al. (2010) analizaron espacialmente la dependencia de la salida de los modelos de decisión multicriterio a los cambios de pesos. Rocha et al. (2010) propusieron una metodología de AS espacialmente explícita que considera las variaciones de la distribución espacial de las variables incluidas en el modelo utilizando el enfoque “One-Factor-At-A-Time” (OAT) (Daniel, 1958). Este enfoque modifica un componente del modelo a la vez mientras mantiene el resto constantes y evalúa los cambios en la salida. Xu y Zhang (2013) presentaron un enfoque que consiste en la evaluación de la aptitud de tierras y el análisis de sensibilidad espacialmente explícito que acopla visualización espacial e indicadores de resumen usando métricas tradicionales y métricas espacialmente explícitas para abordar la incertidumbre de los pesos de los criterios. Ligmann-Zielinska y Jankowski (2014) desarrollaron el software Integrated Uncertainty and Sensitivity Analysis (iUSA v1) a través del cual analizan la incertidumbre del modelo respecto de los pesos de los criterios. Para ello utilizaron simulaciones de Monte Carlo para producir múltiples mapas de aptitud, estimaron la incertidumbre mediante el desvío estándar de la aptitud media y finalmente emplearon el enfoque de análisis de sensibilidad basado en la varianza (Homma y Saltelli, 1996; Saltelli et al., 1999, 2008). Este enfoque descompone la variabilidad de la aptitud, sus componentes son atribuidos a los pesos de los criterios individuales.

1.2. Área de estudio, justificación, objetivos y actividades.

1.2.1. Área de estudio

Esta tesis comprende al noroeste Argentino (NOA). El NOA está integrado por las provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán y Santiago del Estero (Figura 1.1), abarca una superficie de aproximadamente 47 millones de hectáreas. La región está

ubicada en la franja comprendida entre los paralelos $21^{\circ} 40'$ S al norte y $30^{\circ} 25'$ S al sur y los meridianos $61^{\circ} 35'$ W al este y $69^{\circ} 10'$ W al oeste y tiene una superficie equivalente al 17% del total de la Argentina.

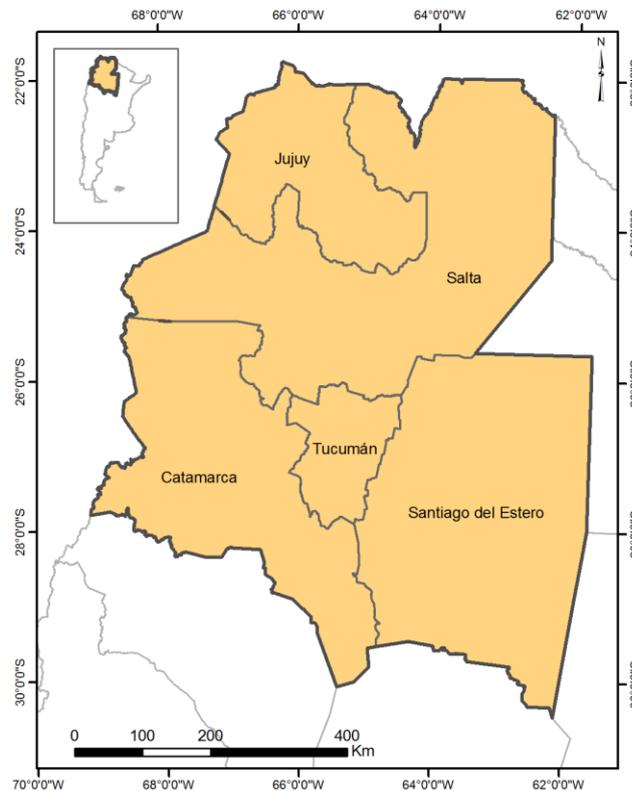


Figura 1.1. Ubicación del área de estudio: el Noroeste Argentino.

1.2.2. Justificación

Un rasgo característico del NOA es su marcada heterogeneidad fisiográfica y ambiental, reflejada en el hecho de que con sólo un 17% de la superficie de Argentina, el NOA contiene al 50% de las regiones fitogeográficas terrestres definidas por Cabrera (1976) para el país (Ferro y Barquez, 2014). Es la región natural de la Argentina en la que el cambio de uso de suelo se ha intensificado más en los últimos años, registrándose las tasas de deforestación y fragmentación del hábitat más altas de la historia (1,15% anual) y duplicando el promedio de deforestación latinoamericano y mundial (Grau y Aide, 2008; Gasparri y Grau, 2009; Volante et al., 2012, Vallejos et al. 2015). Las evidencias muestran que la conversión de los ecosistemas naturales en tierras agrícolas modifica su estructura y funcionamiento (Guerschman, 2005; Paruelo et al., 2006; Volante et al., 2012). En el NOA, la conversión de tierras naturales es destinada a pasturas implantadas para ganadería (mayoritariamente con *Gatton panic*) o a cultivos extensivos de verano como soja, maíz, algodón, poroto y a cultivos de invierno, principalmente trigo, cártamo y garbanzo (Paoli, et al., 2000-2017).

Ante estas transformaciones del territorio, Viglizzo et al. (2012) sostienen que si bien las visiones modernas de política de uso de la tierra tratan de lograr una armonización perdurable de intereses económicos, sociales y ambientales en la sociedad a nivel local y regional, en la práctica, estos intentos pueden estar en riesgo debido a los intereses en conflicto entre sectores respecto al uso de las tierras. Sugiere además que esta encrucijada, en particular la que transita el NOA, debe resolverse a través de un

ordenamiento territorial acordado entre los gobiernos provinciales, las instituciones científicas y académicas, los usuarios de la tierra y el resto de los sectores de la sociedad involucrados. Para enmarcar este trabajo se tuvieron en cuenta algunos lineamientos teóricos y prácticos enunciados en el documento “Bases para el Ordenamiento del Territorio Rural Argentino” (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, 2012).

El OTR es un proceso político-técnico-administrativo: el componente político determina los objetivos y dirige los conflictos en base a los intereses y valores en pugna, mientras que el componente técnico se ocupa de la caracterización del territorio en la situación presente y de evaluar su comportamiento, en términos de producción de bienes y servicios, bajo distintos escenarios. Se debe propiciar una fluida interacción y diálogo entre estos componentes, siendo imprescindible la participación de múltiples instituciones y actores. Esto implica la necesidad de utilizar una metodología participativa e interactiva para poder alcanzar las metas productivas de forma equilibrada y socialmente justa.

Un proceso de OTR debe definir: (a) la distribución en el espacio y en el tiempo de las actividades productivas, (b) el acceso y usufructo de bienes y servicios provistos por los ecosistemas destinados tanto a la producción como a la conservación, (c) el desarrollo y la distribución de infraestructura productiva y social, promoviendo una distribución más balanceada de la población en el territorio, (d) el monitoreo de los recursos naturales y de los factores de degradación y/o contaminación, (e) la distribución y régimen de uso de las áreas protegidas o de uso público, (f) las necesidades de generación de alternativas de uso. Por otro lado, debe examinar detalladamente la dimensión ambiental, económica, tecnológica, política, social y de desarrollo, tanto de los distintos usos del suelo como de las formas de ocupación del territorio. Se deben establecer tipologías de territorios rurales que contribuyan al diagnóstico, planificación y gestión y que a su vez permitan la diferenciación de las políticas, programas o instrumentos a implementar.

El Estado Nacional y el Sistema de Ciencia y Tecnología deben proveer buena parte del conocimiento y las herramientas necesarias para guiar el proceso de OTR, el cual debe contemplar varias etapas (Gómez Orea, 2008):

El *Diagnóstico territorial* incluye la caracterización del Sistema Territorial: límites conceptuales y geográficos, medio biofísico, social, cultural, económico, institucional, infraestructura, la integración de la información en Sistemas de Información Geográfica, la identificación y caracterización de actores e involucrados.

La *planificación* incluye la definición participativa de los objetivos, la definición de la capacidad de cada una de las unidades de planificación de acoger las distintas alternativas de uso, la definición de las funciones de producción de bienes y servicios ecosistémicos y de las funciones de afectación de los mismos, y la generación de escenarios de uso.

La *gestión territorial* incluye la definición de la responsabilidad de actores e instituciones en la ejecución, el seguimiento y contralor de los planes, la definición de las autoridades de aplicación, de mecanismos de resolución de conflictos y de revisión de planes, y la implementación de planes de seguimiento y acople con esquemas de manejo adaptativo.

Este trabajo tiene por finalidad generar una herramienta que permita a los tomadores de decisiones explorar las posibles opciones de uso de la tierra bajo las condiciones actuales y realizar análisis prospectivos mediante la generación de escenarios para evaluar el impacto potencial de cambios de contexto, integrando aspectos socio-económicos y agro-ecológicos del NOA. Por otro lado se incorporaron análisis de incertidumbre y sensibilidad para evaluar la fiabilidad de los resultados ante variaciones en los parámetros de entrada y especificaciones de las reglas de decisión.

Para ello se desarrolló un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE) que contempla las diferentes etapas del proceso de planificación de uso de las tierras rurales, a través de la incorporación de los siguientes módulos:

- i) regionalización biofísica, socio-económica y político-institucional,
- ii) evaluación de la aptitud de tierras para diferentes usos,
- iii) análisis de sensibilidad e incertidumbre.

El sistema incorpora la opinión, valores e intereses de los actores involucrados y en tal sentido se plantea como un auxiliar en la toma de decisiones, a partir de la posibilidad que ofrece de explorar escenarios futuros alternativos.

Para lograr este objetivo se integraron múltiples metodologías, técnicas y tecnologías: sistemas de información geográfica (SIG), herramientas de teledetección, técnicas de evaluación multicriterio, lógica difusa y distintos análisis estadísticos.

1.2.3. Objetivos

1.2.3.1. Objetivo General

Evaluar diferentes herramientas y metodologías aplicadas al ordenamiento territorial que sirvan de apoyo a la toma de decisiones en la planificación del uso de la tierra en el Noroeste Argentino integrando aspectos socio-económicos y agro-ecológicos.

1.2.3.2. Objetivos Específicos

1. Obtener una regionalización biofísica, socio-económica, político-institucional del territorio y estimar su capacidad de acogida para distintos usos utilizando evaluación multicriterio.
2. Evaluar la sensibilidad de la asignación de usos del territorio (los cuales son función de las metas definidas por los actores e involucrados) a: 1. la selección de criterios de decisión para evaluar la capacidad de acogida para un uso de suelo determinado, 2. Las preferencias asociadas con los criterios de decisión (ponderaciones o pesos) 3. las herramientas de análisis (diferentes técnicas de evaluación multicriterio).
3. Desarrollar un SADE que asista a la toma de decisiones, en las diferentes etapas de un proceso de planificación de uso de las tierras rurales.

1.2.4. Actividades específicas

Las actividades específicas para lograr los objetivos de la tesis son las siguientes:

- a) Utilizar diferentes técnicas de análisis espacial cuantitativo para obtener un diagnóstico del territorio a partir de la definición y caracterización de regiones biofísicas, socio-económicas y político-institucionales del NOA.

- b) Evaluar las potencialidades y limitaciones del territorio para determinados tipos de uso de la tierra considerando variables biofísicas, socio-económicas y político-institucionales.
- c) Comparar diferentes técnicas de evaluación multicriterio en relación a su aptitud para ser utilizadas en el proceso de ordenamiento territorial.
- d) Incorporar la lógica difusa como herramienta para abordar la incertidumbre en la toma de decisiones sobre la planificación del uso y la ocupación del territorio.
- e) Cuantificar la variabilidad de los resultados del modelo de decisión a la incertidumbre de las entradas (criterios y pesos) y a las funciones de agregación (análisis de incertidumbre) y luego cuantificar la contribución de las entradas a la variabilidad de los resultados (análisis de sensibilidad)
- f) Implementar los algoritmos en plataformas de software libre para facilitar su distribución y uso por parte de los actores involucrados en la toma de decisiones.

1.3. Marco conceptual, metodológico y organización de la tesis

1.3.1. Marco conceptual

Se adoptó la definición que concibe al ordenamiento territorial como un proceso político-técnico-administrativo orientado a la organización, planificación y gestión del uso y ocupación del territorio, en función de las características y restricciones biofísicas, culturales, socio-económicas y político-institucionales del mismo (Ministerio de Desarrollo sostenible y Planificación, 2010). Este proceso debe basarse en objetivos explícitos y propiciar además un uso racional y justo del territorio, aprovechando las oportunidades, reduciendo los riesgos, protegiendo los recursos en el largo plazo y asignando en forma racional costos y beneficios del uso y la conservación a los actores involucrados (Paruelo et al., 2014).

Este es un proceso esencialmente político ya que requiere la toma de decisiones concertadas entre diferentes actores: políticos, sociales, económicos, científicos y técnicos.

1.3.2 Metodología

La metodología empleada en este trabajo contempla varias etapas que surgen de la revisión de dos guías metodológicas básicas, con algunas reformulaciones propias del proyecto (Figura 1.2):

- Guía metodológica para la formulación de planes de ordenamiento territorial del Ministerio de Desarrollo sostenible y Planificación, Viceministerio de Planificación estratégica y Participación Popular, Dirección General de Planificación y Ordenamiento Territorial, Unidad de Ordenamiento Territorial. La Paz, Bolivia (2010).
- Proceso metodológico propuesto por Sistema de Información de Recursos de Tierras para la Planificación y Ordenamiento del Uso del Territorio – SIRTPLAN (FAO, 2000)

El desarrollo propuesto por SIRTPLAN comienza con el acceso a la información, en esta etapa se incluye la selección de las variables, la definición de la

escala, la recolección y la cartografía de la información y el ingreso al SIG. SIRTPLAN agrupa las variables en dos dimensiones: una biofísica y otra socioeconómica, mientras que en la guía metodológica se hace referencia a los componentes territoriales: biofísico, sociocultural, económico, político institucional y el funcional. En este trabajo se denominó a esta etapa *sistematización de la información* y se agruparon las variables en tres dimensiones: la biofísica, socioeconómica y la político-institucional. En la selección de las variables se tuvieron en cuenta las variables sugeridas en la guía metodológica para los distintos componentes.

SIRTPLAN denomina a la siguiente etapa proceso de espacialización o definición de las unidades básicas de análisis, que consiste en la estratificación del territorio en áreas más pequeñas con un nivel de homogeneidad en los factores físicos, biológicos y socioeconómicos. De este proceso se obtienen las zonificaciones agroecológica, socioeconómica y ecológica-económica (unidades básicas de análisis) que se obtiene de la superposición de las 2 primeras. En este trabajo se plantean zonificaciones para las tres dimensiones consideradas.

El proceso de evaluación de tierras utilizado por SIRTPLAN consiste en comparar las cualidades de la tierra, incluyendo las características edafo-climáticas, económicas y sociales, con los requerimientos de los tipos de usos de la tierra considerados en la evaluación. En este trabajo, se hace uso del concepto de capacidad de acogida propuesto por Gómez Orea (1992) para hacer referencia al uso óptimo del territorio respecto a su sostenibilidad. Este concepto incluye los análisis de aptitud (la valoración de las oportunidades que el medio ofrece al desenvolvimiento de la actividad humana) e impactos (las limitaciones de uso para evitar el deterioro de los recursos).

La generación de escenarios –una de las propuestas del SIRTPLAN - no se abordó en esta tesis. Otra reformulación de la metodología es la incorporación como etapas transversales a todo el proceso del uso del SIG como herramienta, el análisis de sensibilidad e incertidumbre y, el desarrollo y utilización del Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial.

Con el objetivo de facilitar el uso de los SIG como herramienta para la toma de decisiones bajo un enfoque participativo, y para dar transparencia al proceso de planificación del uso del territorio, se generaron algoritmos implementados en software libre a través del uso de scripts de Python, y geo-algoritmos de SAGA, R, QGIS y GRASS disponibles en el módulo de Procesamiento de QGIS, dando lugar a un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial para el Ordenamiento Territorial (SADEOT). Éste permite llevar a cabo todas las etapas consideradas en la metodología propuesta (en cada capítulo de la tesis se hará mención al script o plugin desarrollado para automatizar los diferentes procesos).

1.3.3. Organización de la tesis

La tesis se organiza de la siguiente manera:

Capítulo 1: Introducción general al tema de la tesis y marco conceptual. Fundamento, objetivos, área de estudio, metodología y organización de la tesis (este capítulo)

Capítulo 2: Regionalización del NOA a partir de las características biofísicas, socio-económicas y político-institucionales, aplicando técnicas de análisis espacial

cuantitativo para obtener un diagnóstico integral del territorio que sirva de insumo para la generación de escenarios.

Capítulo 3: Determinación de la capacidad de acogida para diferentes usos del suelo con el fin de localizar nuevas actividades o usos en aquellos lugares que presenten mayor aptitud para albergarlos.

Capítulo 4: Análisis de incertidumbre para cuantificar la variabilidad de los resultados del modelo de decisión ante la variabilidad de las entradas y de las funciones de agregación y, análisis de sensibilidad para cuantificar la contribución de las entradas a los resultados.

Capítulo 5: Resultados principales, discusión y perspectivas.

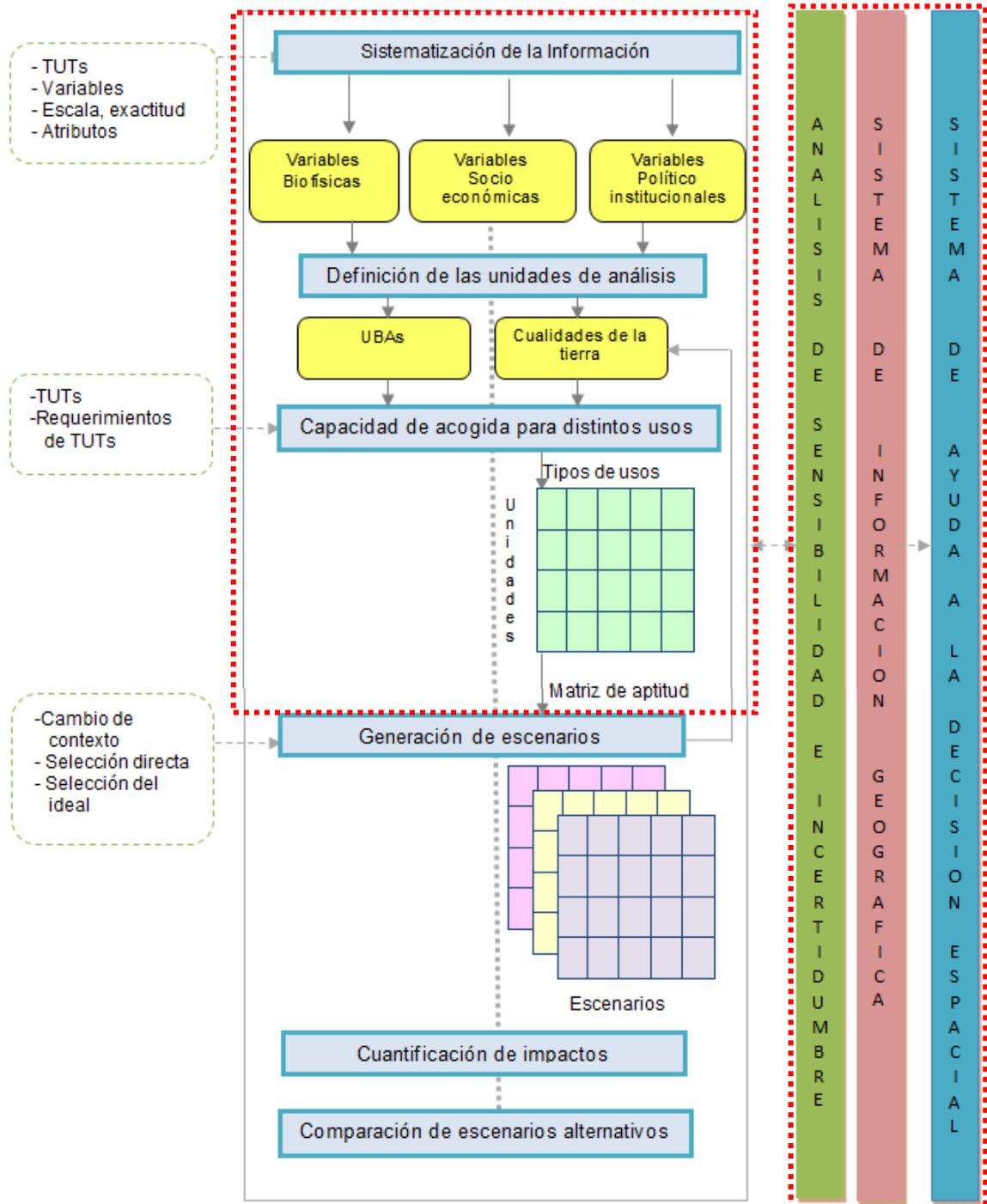


Figura 1.2. Esquema de trabajo propuesto por esta tesis basado en Guía metodológica para la formulación de planes de ordenamiento territorial (Ministerio de Desarrollo sostenible y Planificación La Paz, Bolivia, 2010) y SIRTPLAN (FAO, 2000). UBAs significa Unidades básicas de análisis, TUTs significa Tipos de usos de la tierra). En los marcos de líneas punteadas rojas, se resaltan las etapas desarrolladas en esta tesis.

1.4. Bibliografía

- Andriantiatsaholiniaina, L., V. Kouikoglou & Y. Phillis. 2004. Evaluating strategies for sustainable development: fuzzy logic reasoning and sensitivity analysis. *Ecological Economics* 48(2): 149-172.
- Barral, M. & N. Maceira. 2011. Evaluación ambiental estratégica del ordenamiento territorial. Un estudio de caso para el partido de Balcarce basado sobre el análisis de servicios ecosistémicos. Capítulo 19. En Laterra, P., E. Jobbágy & J. Paruelo (Eds.), *Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. INTA, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-987-679-018-5.
- Bojórquez-Tapia, L., S. Sánchez-Colón & A. Flore Martínez. 2005. Building consensus in Environmental Impact Assessment through Multicriteria Modeling and Sensitivity Analysis. *Environmental Management* 36(3):469-481.
- Borouhaki, S. & J. Malczewski. 2010. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision-making. *Computers & Geosciences* 36(3): 302-312.
- Burgman, M. 2005. *Risks and decisions for conservation and environmental management*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Burrough, R., R. Macnillan & W. Van Deusen. 1992. Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observation and topography. *Journal of Soil Sciences* 43, 193-210.
- Chen, Y., J. Yu, & S. Khan. 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1582-1591.
- Chen, Y. & Z. Paydar. 2012. Evaluation of potential irrigation expansion using a spatial fuzzy multi-criteria decision framework. *Environmental Modelling & Software* 38, 147-157.
- Cabrera, A. 1976. *Regiones fitogeográficas argentinas*. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Segunda edición, ACME, Buenos Aires. 85 p
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), Banco Mundial y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2001. *Proyecto Desarrollo de Indicadores de Sustentabilidad Rural: Una visión para América Central*.
- Daniel, C. 1958. 131 Note: on varying one factor at a time. *Biometrics* 14, 2.
- Day, R., M. Anderson, E. Steele & M. Broos. 2000. *Farmland Protection and GIS: GIS Interface Helps Pennsylvania Counties Prioritize Farmland for Preservation*. Pennsylvania State University, Chesapeake.
- Deep, K., K. Singh, M. Kansal & C. Mohan. 2011. An interactive method using genetic algorithm for multi-objective optimization problems modeled in fuzzy environment. *Expert Systems with Applications* 38(3): 1659-1667.
- Delgado, M. & J. Bosque Sendra. 2004. Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision-making: a review. *Human and Ecological Risk Assessment*, 10(6), 1173-1187.
- Eastman, J., W. Jin, P. Kyem & J. Toledano. 1995. Raster procedures for multi-criteria/multiobjective decisions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 61(5): 539-547.

- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2000. Sistema de Información de Recursos de Tierras para la Planificación y Ordenamiento del Uso del Territorio. FAO, Santiago, Chile.
- Feizizadeh, B., P. Jankowski & T. Blaschke. 2014. A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computers & Geosciences* 64(0): 81-95.
- Fernández, L. & R. Pizzolato. 2014. Ejemplo de ordenamiento territorial rural en el departamento Tupungato, Mendoza-Argentina. *Revista Proyección 16 - Gestión pública y participación ciudadana* (8): 59-80.
- Ferro, I. & R. Barquez. 2014. Patrones de distribución de micromamíferos en gradientes altitudinales del noroeste Argentino. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 472-490.
- Fisher, B., R. Turner & P. Morling. 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecol. Econ.* 68(3): 643-653.
- Frau, C., G. Valenzuela & Y. Rojas. 2006. Spatial modeling by means of Geomatic and Multicriteria Evaluation for territorial arrangement. *Revista Facultad Ingeniería Universidad Tarapacá* 14(1): 81-89.
- Funtowicz, S. & J. Ravetz. 1993. Epistemología política, ciencia con la gente. Buenos Aires, CEAL. Serie Fundamentos de las Ciencias del Hombre nro.107.
- García Collazo M. & J. Paruelo. 2014. Ordenamiento territorial de bosques nativos: resultados de la zonificación en la Argentina. Capítulo 18. En J. Paruelo, E. Jobbágy, P. Laterra, H. Diéguez, M. García Collazo & A. Panizza (eds.), *Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias*. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-92-5-308619-1.
- Gasparri, N. & R. Grau, 2009. Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina (1972-2007). *Forest Ecology and Management* 258: 913-921.
- Gavier-Pizarro, G., N. Calamari, M. Piquer Rodríguez & T. Kuemmerle. 2014. El método de construcción de escenarios aplicado al ordenamiento territorial. Capítulo 11. En J. Paruelo, E. Jobbágy, P. Laterra, H. Diéguez, M. García Collazo & A. Panizza (eds.), *Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias*. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-92-5-308619-1.
- Gaviño Novillo, M. & R. Sarandón. 2002. Evaluación ambiental regional. Metodologías utilizadas en el Estudio Regional de Riesgos Hidrogeológicos del NOA Argentino. Documento N° 2 en Seminario Taller Gobiernos Locales y la gestión de los recursos hídricos.
- Gómez Orea, D. 1992. *Evaluación de Impacto Ambiental*. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid, 222 p.
- Gómez Orea, D. 2008. *Ordenación territorial*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Grau, H. & M. Aide. 2008. Globalization and land-use transitions in Latin America. *Ecology and Society* 13(2): 16. Disponible en: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art16/>

- Griffiths, N., J. Bono, M. García Collazo & y M. Taurian. 2014. Situación de los Ordenamientos Territoriales de Bosques Nativos en la Región Chaqueña – Ley N° 26.331. I Congreso Internacional del Gran Chaco Americano Territorio e Innovación. Disponible en http://www.congracha.org/web/publicaciones_digital/001/html/06.eje4.19.htm. Consultado Marzo/2015
- Guerschman, J. 2005. Análisis regional del impacto de los cambios del uso de la tierra sobre el funcionamiento de los ecosistemas de la región pampeana (Argentina). Tesis. Escuela Para Graduados “Alberto Soriano” Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 143pp.
- Hall, O. & W. Arnberg. 2002. A method for landscape regionalization based on fuzzy membership signatures. *Landscape and Urban Planning* 59(4): 227-240.
- Hawkins, V. & P. Selman. 2002. Landscape scale planning: exploring alternative land use scenarios. *Landscape and Urban Planning* 60(4): 211-224.
- Herrmann, S. & E. Osinski. 1999. Planning sustainable land use in rural areas at different spatial levels using GIS and modelling tools. *Landscape and Urban Planning* 46(1-3): 93-101.
- Holzkämper, A. & R. Seppelt. 2007. A generic tool for optimising land-use patterns and landscape structures. *Environmental Modelling & Software* 22(12): 1801-1804.
- Homma, T. & A. Saltelli. 1996. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 52: 1-17.
- Janssen, R., M. van Herwijnen, T. Stewart & J. Aerts. 2008. Multiobjective decision support for land use planning. *Environment and planning B: Planning and design* 35: 740-756.
- Kai, C., H. Bo, W. Shaowen & L. Hui. 2012. Sustainable land use optimization using Boundary-based Fast Genetic Algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems* 36(3): 257-269.
- Lahdelma, R., P. Salminen & J. Hokkamen. 2000. Using Multicriteria Methods in Environmental Planning and Management. *Environmental Management* 26(6): 595-605.
- Ligmann-Zielinska, A. & P. Jankowski. 2014. Spatially-explicit integrated uncertainty and sensitivity analysis of criteria weights in multicriteria land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software* 57(0): 235-247.
- Liu, Yaolin., L. Jiao, Yanfang Liu & J. He. 2013. A self-adapting fuzzy inference system for the evaluation of agricultural land. *Environmental Modelling & Software* 40(0): 226-234.
- Mahmoud, M., Y. Liu, H. Hartmann, S. Stewart, T. Wagener, D. Semmens, R. Stewart, H. Gupta, D. Dominguez, F. Dominguez, D. Hulse, R. Letcher, B. Rashleigh, C. Smith, R. Street, J. Ticehurst, M. Twery, F. Van Delden, H. Waldick, D. White & L. Winter. 2009. A formal framework for scenario development in support of environmental decision-making. *Environmental Modelling & Software* 24: 798-808.
- Matthews, K., A. Sibbald & S. Craw. 1999. Implementation of a spatial decision support system for rural land use planning: integrating geographic information system and environmental models with search and optimization algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 23(1): 9-26.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2012. Bases para el Ordenamiento del Territorio Rural Argentino. Ed. Minagri.

- Ministerio de Desarrollo sostenible y Planificación, Viceministerio de Planificación estratégica y Participación Popular, Dirección General de Planificación y Ordenamiento Territorial, Unidad de Ordenamiento Territorial. Documento de Trabajo. 2010. Guía metodológica para la formulación de planes de ordenamiento territorial. La Paz, Bolivia. Disponible en http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADT963.pdf . Consultado Marzo/2012.
- Munda, G. 2004. Social multi-criteria evaluation: Methodological foundations and operational consequences. *European Journal of Operational Research* 158: 662–677.
- NCGIA. 1990. Core curriculum. 3 Volumes. I. Introduction to GIS. II. Technical issues in GIS. III. Application issues in GIS. Santa Barbara, California. National Center for Geographic Information and Analysis/University of California.
- Orán Cáceres, J., M. Gómez Delgado & J. Bosque Sendra. 2010. Una propuesta complementaria de análisis de sensibilidad de un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 971-987. ISBN: 978-84-472-1294-1
- Paoli, H., J. Volante, Y. Noe, L. Vale, H. Elena, M. Morales Ponclava & M. Mosciaro. 2000 – 2017. PRORENOA: Monitoreo de cultivos del noroeste argentino a través de sensores remotos. Informes y mapas de campañas agrícolas (cultivos extensivos) desde el año 2000 a la actualidad. Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/monitoreo-de-cultivos-del-noroeste-argentino-a-traves-de-sensores-remotos>. Consultado Junio/2017.
- Paruelo, J., J. Guerschman, G. Piñeiro, E. Jobbágy, S. Verón, G. Baldi & S. Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia*. 10: 47 - 61
- Paruelo, J., E. Jobbágy, P. Litter, H. Dieguez, M. García Collazo y A. Panizza (Eds.). 2014. *Ordenamiento Territorial Rural Conceptos, métodos y experiencias*. FAO-FAUBA-MINAGRI.
- Phillis, Y. & L. Andriantiatsaholainaina. 2001. Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics* 37: 435–456.
- Pourebrahim, S., M. Hadipour & M. Bin Mokhtar. 2011. Integration of spatial suitability analysis for land use planning in coastal areas; case of Kuala Langat District, Selangor, Malaysia. *Landscape and Urban Planning* 101(1): 84-97.
- Rocha, W., M. Delgado & J. Bosque Sendra. 2010. Sensitivity analysis for spatial simulation of urban growth. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2(6): 7718-7719.
- Román, M. Metodologías multicriterio para el ordenamiento territorial. 2014. Capítulo 12. En J. Paruelo, E. Jobbágy, P. Litter, H. Diéguez, M. García Collazo & A. Panizza (eds.), *Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias*. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-92-5-308619-1.
- Rossiter, D. 1990. ALES: a framework for land evaluation using a microcomputer. *Soil Use Management* 6 (1): 7–20.
- Saltelli, A., S. Tarantola & K. Chan. 1999. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics* 41: 39-56.

- Saltelli, A., M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana & S. Tarantola. 2008. *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. Wiley-Interscience, Chichester, England.
- Santé-Riveira, I., R. Crecente-Maseda & D. Miranda-Barrós. 2008. GIS-based planning support system for rural land-use allocation. *Computers and Electronics in Agriculture* 63(2): 257-273.
- Schweitzer, C., J. Priess, S. Das, et al. 2011. A generic framework for land-use modelling. *Environmental Modelling & Software* 26(8): 1052-1055.
- Stewart, T., R. Janssen & M. van Herwijnen. 2004. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. *Computers & Operations Research* 31(14): 2293-2313.
- Stewart, T. & R. Janssen. 2014. A multiobjective GIS-based land use planning algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems* 46(0): 25-34.
- Tenerelli, P. & S. Carver. 2012. Multi-criteria, multi-objective and uncertainty analysis for agro-energy spatial modeling. *Appl. Geogr* 32: 724–736.
- Vallejos, M., J. Volante, M. Mosciaro, L. Vale, M. Bustamante & J. Paruelo 2015. Transformation dynamics of the natural cover in the Dry Chaco ecoregion: A plot level geo-database from 1976 to 2012. *Journal of arid environments* 123:3-11.
- Vía, M., C. Muñoz & B. Martín. 2006. Evaluación multicriterio en la valoración de la vegetación y flora de las áreas no protegidas de la comunidad de Madrid. Centro de Investigaciones Ambientales de la Comunidad de Madrid “Fernando González Bernáldez” (CIAM). XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica – GRANADA – Septiembre 2006.
- Viglizzo, E., L. Carreño, J. Volante & M. Mosciaro. 2011. Valuación de bienes y servicios ecosistémicos: ¿Verdad objetiva o cuento de la buena pipa? p. 17–36. En Viglizzo, E., J. Paruelo, P. Littera (eds.), *Expansión e intensificación agrícola en Argentina: Valoración de bienes y servicios ecosistémicos para el ordenamiento territorial*. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Viglizzo, E., J. Paruelo, P. Littera & E. Jobbagy. 2012. Ecosystem service evaluation to support land-use policy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 154(0): 78-84.
- Volante, J., D. Alcaraz-Segura, M. Mosciaro, E. Viglizzo & J. Paruelo. 2012. Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154 (2012) 12 – 22.
- Xu, E. & H. Zhang. 2013. Spatially-explicit sensitivity analysis for land suitability evaluation. *Applied Geography* 45(0): 1-9.
- Zadeh, L. 1965. Fuzzy sets. *Information and Content* 8 (3), 338–353.
- Zhang, B., Y. Zhang, D. Chen, R. White, Y. Lu. 2004. A quantitative evaluation system of soil productivity for intensive agriculture in China. *Geoderma* 123 (3-4), 319-331.
- Zopounidis, C. & P. Parpalos. 2010. *Handbook of multicriteria Analysis*. Springer
- Zoras, S., A. Triantafyllou & P. Hurley. 2007. Grid sensitivity analysis for the calibration of a prognostic meteorological model in complex terrain by a screening experiment. *Environmental Modelling & Software*, 22(1), 33-39.

CAPITULO 2. Zonificación Biofísica, Socio-económica y Político-institucional

2.1. Introducción

La regionalización es el paso inicial del proceso de diagnóstico y evaluación del ambiente a escala regional ya que permite analizar espacialmente la estructura y el funcionamiento del territorio en cuestión (Gandini, 2005). Una metodología objetiva para la regionalización es la subdivisión del área de estudio en elementos ambientales uniformes y su posterior agrupamiento o clasificación mediante técnicas de análisis multivariado (Gallopín, 1982 y Gazia et al., 1982)

Un rasgo característico del noroeste argentino (NOA) es su marcada heterogeneidad fisiográfica y ambiental, reflejada en el hecho de que con sólo un 17% de la superficie de Argentina, contiene al 50% de las regiones fitogeográficas terrestres definidas por Cabrera (1976) para el país (Ferro y Barquez, 2014)

En el NOA se hicieron diversos trabajos con el fin de delimitar zonas homogéneas: ecorregiones (Mendoza y González, 2011), zonas agroecológicas (Godagnone y De la Fuente, 2000), zonas agroeconómicas (Bravo et al., 2001). Estos trabajos varían en cuanto a las variables utilizadas, a la metodología aplicada y a los objetivos planteados. En el caso de la zonificación agroecológica (Godagnone y De la Fuente, 2000), se hace mención a las fuentes de datos utilizadas y se describen las unidades resultantes de este análisis, sin describir la metodología. Para obtener la zonificación agroeconómica (Bravo et al., 2001) y la delimitación de ecorregiones (Mendoza y González, 2011), se utilizaron mapas temáticos existentes para el NOA, conocimiento de los expertos y modelos para integrar la información y delimitar las unidades. Si bien la cartografía generada en trabajos previos es altamente valorable y ha sido muy utilizada, en esta tesis, se planteó una metodología de trabajo basada en bases de datos de libre acceso (en el caso de no disponer de bases de datos locales), haciendo que sea fácilmente replicable en el tiempo y en el espacio, y que generó una caracterización de la distribución espacial de las condiciones biofísicas, socio-económicas y político-institucionales de la región y su evolución en el tiempo. Además se generaron herramientas, de modo que la ausencia de expertos no sea una limitante insalvable para zonificar y caracterizar el territorio, a diferentes escalas.

El objetivo general de este capítulo es adaptar y aplicar métodos de análisis espacial cuantitativo para obtener la regionalización del NOA a partir de las características biofísicas, condiciones socio-económicas y político-institucionales. Esta zonificación permitirá caracterizar el área de estudio y delimitar áreas o unidades de análisis a considerar en las etapas de evaluación de capacidad de acogida y asignación de usos del suelo.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Generar una base de datos a partir de las variables que describen las características biofísicas, socio-económicas y político-institucionales del NOA.
2. Analizar información geográfica y alfanumérica generada por diferentes instituciones a nivel nacional utilizando un Sistema de Información Geográfica.
3. Obtener propuestas de regionalización utilizando métodos de análisis espacial cuantitativo considerando las características biofísicas, socio-económicas y político-institucionales.

4. Formular una propuesta de regionalización integrada para determinar las unidades básicas de análisis sobre las cuales plantear diferentes escenarios ajustados a las características propias de la UBAs.

2.2. Materiales y Métodos

El proceso de regionalización consistió en: i) la obtención de unidades biofísicas homogéneas, ii) la obtención de unidades socio-económicas homogéneas, iii) la obtención de unidades político-institucionales homogéneas y por último, iv) la superposición de las zonificaciones obtenidas en i), ii) y iii) para obtener las UBAs a considerar en las siguientes fases del proceso (Figura 2.1).

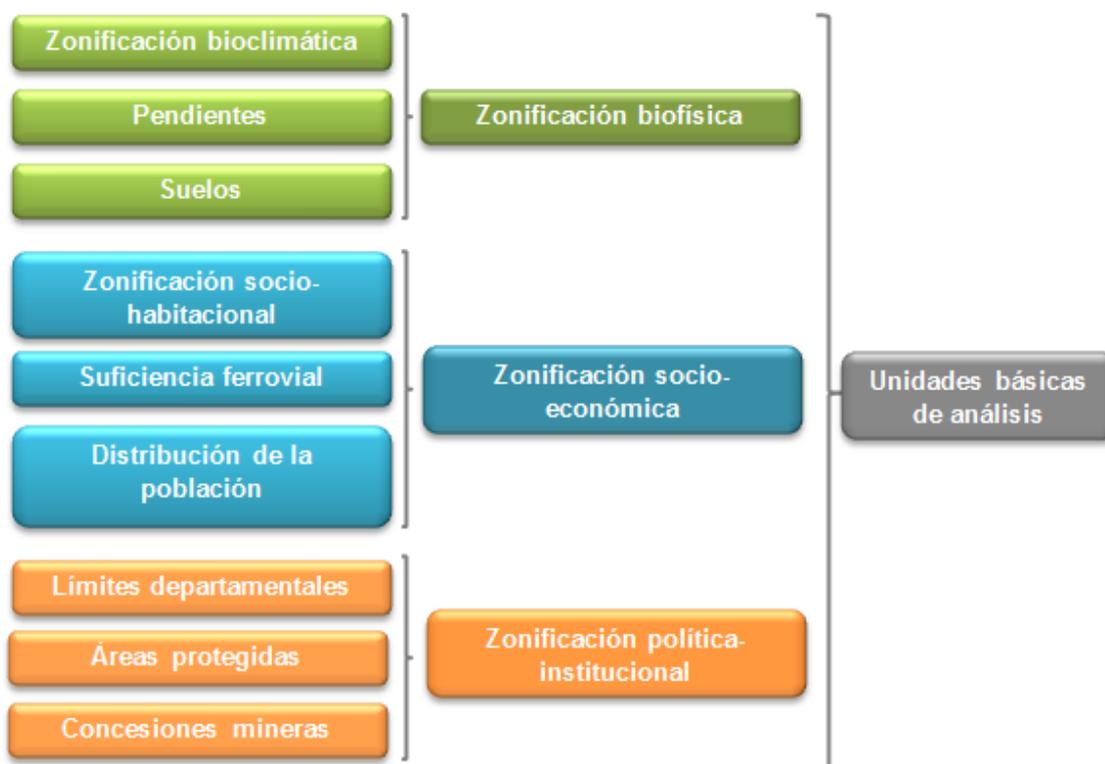


Figura 2.1. Esquema metodológico para obtener la zonificación Biofísica, Socio-económica y Político-institucional

Como fuentes principales de información se utilizaron bases de datos geográficas de INTA, el censo nacional de población y vivienda del año 2010 (INDEC, 2011), el SIG-250 del Instituto Geográfico Nacional (Escala 1:250.000) (IGN, 2012), la base de datos climática global WorldClim versión 1.4 (Hijmans et al., 2005), el Modelo Digital de Elevación versión 4 (por sus siglas en Inglés, DEM) de resolución espacial de 90 metros de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) del CGIAR-CSI.

Los datos utilizados fueron sistematizados y cargados en una base de datos postgis en un servidor de la red GeoINTA y accesibles a través de un servicio WMS (Web Mapping Service).

2.2.1. Zonificación biofísica

Para la obtención de la zonificación biofísica se consideraron variables provenientes de la base de datos WorldClim, el modelo de elevación digital y el mapa

de suelos de la república Argentina (INTA, 1990). Se realizó en primera instancia una zonificación bioclimática sobre la cual se superpusieron mapas temáticos derivados de una clasificación de pendientes y de suelos.

Para realizar la zonificación bioclimática, se consideraron las 19 variables bioclimáticas que provee Worldclim. Los datos climáticos del área de estudio fueron descargados con una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 Km en el Ecuador). El área de estudio fue dividida mediante una grilla regular de 9 Km². Se obtuvieron los centroides para cada una de las 52192 celdas (aprox. 477590 Km²) y se extrajeron los datos correspondientes a cada una de las 19 variables bioclimáticas utilizando DIVA-GIS 7.4.

Se calcularon estadísticos espaciales considerando todas las celdas del área de estudio para las 19 variables (mínimo, máximo, media, desvío estándar y coeficiente de variación, Tabla 2.1). Con el objetivo de seleccionar aquellas que muestren una mayor variabilidad, por considerarse variables potencialmente discriminantes, se procedió a eliminar las variables con un coeficiente de variación menor al 50% (Berdegú, 1990; Paz et. al., 2003). Con las 10 variables seleccionadas de acuerdo a este criterio, se calculó la matriz de correlación (Tabla 2.2)

Tabla 2.1. Estadísticos resumen de las variables bioclimáticas. En celeste se muestran las variables con coeficientes de variación mayores al 50%.

Variable	Descripción	Mínimo	Máximo	Media	Desvío Estándar	Coefficiente Variación
bio1	Temperatura anual promedio	-9,2	23,4	16,0	6,8	42,6
bio2	Rango medio diario (temp max-temp min; promedio mensual)	9,6	20,7	14,7	1,7	11,3
bio3	Isotermalidad (bio 1/ bio 7) * 100	45,1	72,0	55,1	6,2	11,3
bio4	Estacionalidad en temperatura (coeficiente de variación intra-anual)	241,5	614,9	436,1	75,0	17,2
bio5	Temperatura máxima del trimestre más caluroso	1,1	36,6	28,6	7,6	26,6
bio6	Temperatura mínima del mes más frío	-19,9	9,9	1,8	6,6	372,8
bio7	Rango anual de temperatura (bio5-bio6)	18,8	34,3	26,8	2,7	10,2
bio8	Temperatura promedio en el trimestre más lluvioso	-6,4	27,9	20,6	7,4	36,1
bio9	Temperatura promedio en el trimestre más seco	-9,4	19,9	11,0	5,8	52,7
bio10	Temperatura promedio en el trimestre más caluroso	-6,3	27,9	20,9	7,6	36,4
bio11	Temperatura promedio en el trimestre más frío	-12,5	18,0	10,3	6,3	60,5
bio12	Precipitación anual	27,0	1240,0	475,3	288,2	60,6
bio13	Precipitación en el mes más lluvioso	8,0	243,0	94,5	50,6	53,5
bio14	Precipitación en el mes más seco	0,0	32,0	3,9	4,0	101,5
bio15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación intra-anual)	37,5	164,2	95,8	21,6	22,5
bio16	Precipitación en el trimestre más lluvioso	17,0	670,0	254,0	140,9	55,5
bio17	Precipitación en el trimestre más seco	0,0	107,0	16,6	14,9	89,6
bio18	Precipitación en el trimestre más caluroso	16,0	670,0	251,6	139,7	55,5
bio19	Precipitación en el trimestre más frío	0,0	109,0	18,3	15,3	83,5

Tabla 2.2. Matriz de correlación de las variables con coeficientes de variación mayores al 50%. En rojo se resaltan los coeficientes de correlación mayores a 0,7.

Variable	bio6	bio9	bio11	bio12	bio13	bio14	bio16	bio17	bio18	bio19
bio6										
bio9	0,99									
bio11	0,99	0,99								
bio12	0,87	0,87	0,87							
bio13	0,84	0,84	0,85	0,97						
bio14	0,52	0,49	0,49	0,64	0,48					
bio16	0,84	0,85	0,85	0,98	1,00	0,49				
bio17	0,59	0,57	0,57	0,72	0,54	0,98	0,57			
bio18	0,84	0,85	0,85	0,98	1,00	0,48	1,00	0,56		
bio19	0,60	0,57	0,57	0,70	0,52	0,94	0,55	0,98	0,54	

Con las variables seleccionadas, se realizó un Análisis de Componentes Principales. Este proceso (Figura 2.2) se llevó a cabo sobre la tabla de atributos de la grilla que cubre el área de estudio, previa estandarización de los datos (Figura 2.2.a) con el fin de obtener un nuevo conjunto de variables (factores) no correlacionados que expliquen la estructura de variación en la tabla de atributos. Se retuvieron los 3 primeros factores (Figura 2.2.b), dado que explicaron más del 90% de la variabilidad total de los datos. En la tabla 2.3 se pueden ver los autovalores asociados a cada factor, la proporción de variabilidad total explicada por cada factor y la proporción de la variabilidad total explicada, en forma acumulada.

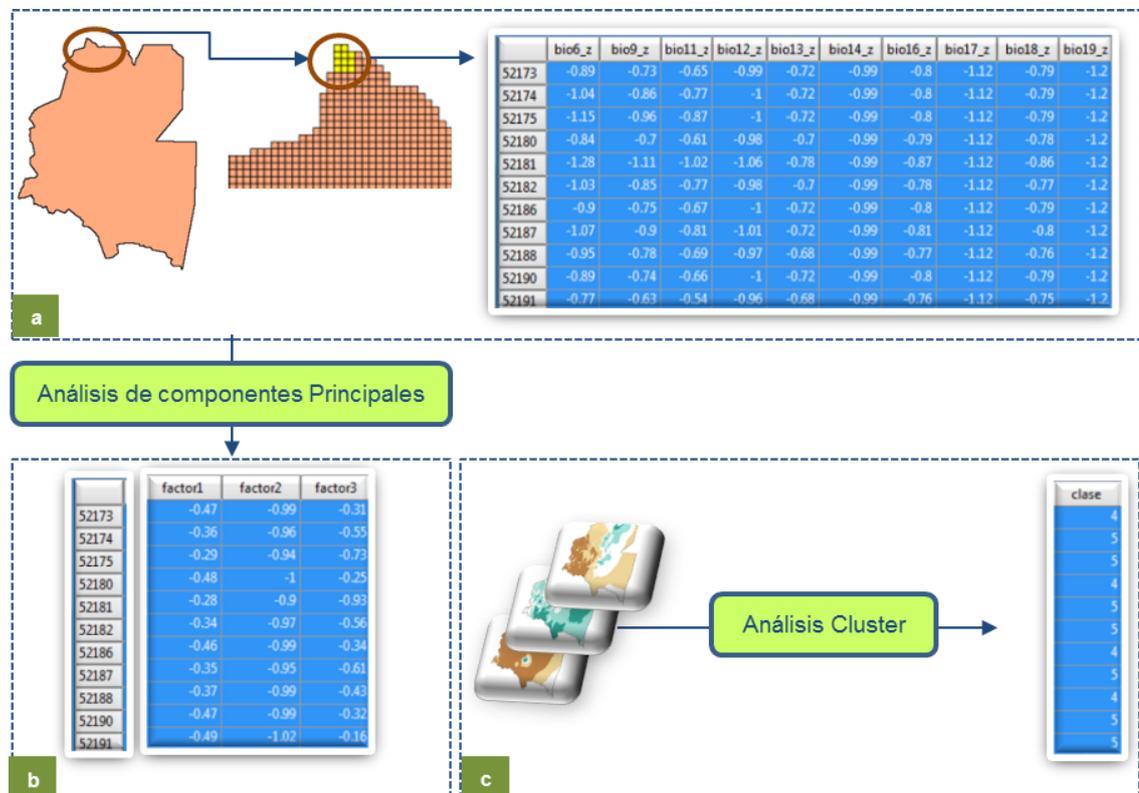


Figura 2.2. Esquema del proceso de ACP y análisis cluster. a) Grilla asociada al área de estudio con su tabla de atributos. Cada fila se corresponde a una celda y cada columna muestra los valores estandarizados de las variables seleccionadas. b) los factores 1, 2 y 3 derivados del ACP, c) imagen compuesta por tres bandas (factor1, factor 2 y factor 3) y clase resultante del análisis cluster.

Tabla 2.3. Autovalores, porcentaje de variabilidad total y variabilidad total acumulada por los factores seleccionados.

Factor	Autovalor	% Variabilidad Total	% Variabilidad Total acumulada
1	7,81	78,13	78,13
2	1,60	16,09	94,22
3	0,48	4,8	99,02

La ortogonalidad de los factores obtenidos como combinación lineal de las variables originales, garantiza que cada factor provea nueva información (no redundante) sobre la variabilidad bioclimática de la región. Con el fin de facilitar la interpretación de los factores se llevó a cabo una rotación de los ejes (normalización varimax, Kaiser, 1958). El objetivo de la rotación varimax es conseguir que la correlación de cada una de las variables sea lo más próxima a 1 con sólo uno de los factores y próxima a cero con todos los demás.

Se obtuvo la tabla de saturaciones o cargas que muestra la correlación entre el factor y cada variable original, de tal forma que es posible identificar las variables con mayor asociación con el factor. Se tomaron las saturaciones más altas (valores mayores a 0,7 o menores a -0,7), por ser indicativos de una fuerte presencia de la variable en el factor, facilitando de esta manera su interpretación (Tabla 2.4)

Tabla 2.4. Tabla de saturaciones o cargas. En rojo se resaltan las saturaciones más altas (valores mayores a 0,7 o menores a -0,7) que identifican las variables con mayor asociación con el factor.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
bio6	0,50	0,30	0,81
bio9	0,51	0,27	0,82
bio11	0,52	0,27	0,81
bio12	0,79	0,43	0,44
bio13	0,88	0,23	0,41
bio14	0,21	0,95	0,16
bio16	0,87	0,26	0,41
bio17	0,27	0,93	0,23
bio18	0,88	0,25	0,41
bio19	0,23	0,92	0,26

Se generó una imagen compuesta por los valores de los tres factores seleccionados (Figura 2.2.c), la cual fue clasificada mediante un algoritmo de clasificación jerárquica (cluster; Legendre y Legendre, 1998), utilizando el método de las distancias mínimas que considera que la distancia o similitud entre dos clases viene dada, por la mínima distancia (o máxima similitud) entre sus componentes.

La clasificación se llevó a cabo estableciendo las opciones de normalizar los valores de las variables y agrupar en 5 clases (Figura 2.4) las cuales se caracterizaron a partir de los valores medios de las variables bioclimáticas seleccionadas (Tabla 2.7). El número de clases se definió a partir del mapa climático de Köppen, quien define 5 tipos de climas para la región NOA en base a valores medios anuales y mensuales.

A partir del Modelo de Elevación Digital, se obtuvo el mapa de pendientes expresadas en porcentaje. Se reclasificaron las pendientes en 4 categorías (Adaptado de FAO, 2009): 3. Tierras a nivel (pendientes menores a 5%), 2. Tierras de pendiente ligera (pendientes entre 5 y 10%), 1. Tierras con pendiente moderada (pendientes entre 10 y 30%) y 0. Tierras escarpadas (pendientes mayores a 30%). Se descartaron las unidades menores a 600 ha, con el fin de cartografiar unidades de mapeo que muestren patrones generales, de acuerdo a la escala de análisis. (Figura 2.5).

Las unidades cartográficas de suelos (grandes grupos de los suelos dominantes) fueron reclasificadas *ad hoc* en función de la aptitud para uso agropecuario más frecuente de los suelos pertenecientes a ese gran grupo. Los grandes grupos fueron asignados a estas tres grandes clases, a partir de la opinión de un experto en clasificación y aptitud de suelos, Ing. Agr. Mauricio Niborski: 0. No apto, 1. Marginalmente apto y 2. Apto (Figura 2.6). En el apéndice A, Tabla A.1 se presenta la correspondencia entre grandes grupos y aptitud. Los mapas se superpusieron de modo de obtener una zonificación biofísica a escala regional (Figura 2.7)

2.2.2. Zonificación socio-económica

Se realizó en primera instancia una zonificación socio habitacional a la cual se superpuso un mapa de suficiencia ferroviaria (variable de infraestructura y conectividad) y un mapa de distribución de la población. La zonificación socio habitacional se basó en un análisis de encadenamiento (“linkage analysis”, McQuitty 1957). Esta metodología ha comenzado a utilizarse recientemente en aplicaciones socioespaciales orientadas a la regionalización (Racine y Raymond 1973, Hagget 1977, Buzai 2003, Jiménez 2009). La técnica se basa en medir el grado de semejanza de las unidades espaciales a través del coeficiente de correlación de Pearson / similitud entre cada par de unidades espaciales, considerando la totalidad de las variables, de modo de generar grupos que conformen regiones homogéneas.

Las unidades espaciales (UE) consideradas en nuestro estudio corresponden a los 99 departamentos que integran las provincias del NOA. En base a la revisión de trabajos previos realizados en el país (Buzai, 2003) con el fin de obtener regiones homogéneas utilizando datos censales y, a la disponibilidad de los datos, se seleccionaron 44 variables (Apéndice A). Estas variables permitieron analizar aspectos demográficos, habitacionales, educacionales, del régimen de tenencia de la vivienda, de infraestructura de servicios y pobreza, obtenidas a partir del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del año 2010 (INDEC, 2011). Los datos fueron procesados con Redatam+SP (CEPAL/CELADE, 2013) y se obtuvo de esta manera la matriz de datos originales (MDO). El siguiente paso fue estandarizar la MDO para obtener “la matriz de datos Z” (MDZ, ecuación 2.1, Buzai 2003).

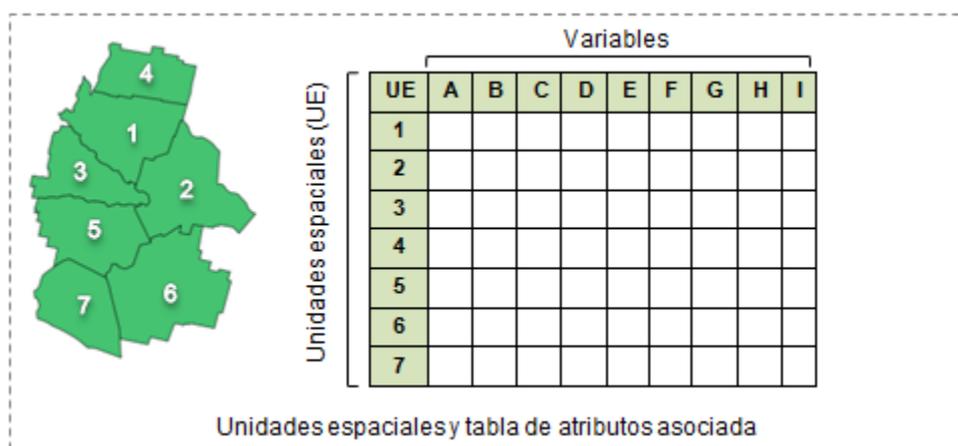
$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \quad (2.1)$$

Donde x_{ij} es el valor de la variable j de la UE i , \bar{x}_j es la media aritmética de la variable j y σ_j es el desvío estándar de la variable j .

El procedimiento consistió en los siguientes pasos aplicados sobre la MDZ (Figura 2.3, adaptado de Buzai y Baxendale, 2006):

1. Cálculo de coeficiente de correlación de unidades espaciales.
2. Determinación de los máximos valores de correlación para cada columna de la tabla de correlaciones.
3. Generación de listado con las unidades espaciales que tengan los máximos valores de correlación (pares).
4. Determinación de pares recíprocos, pares con máximas correlaciones de manera bidireccional, Ej. UE "1" tiene correlación máxima con UE "4" y UE "4" tiene correlación máxima con UE "1". Por lo tanto 1 – 4 forman un par recíproco.
5. Graficar los pares recíprocos, cada unidad espacial en un círculo y ambos círculos unidos por doble línea (núcleo de la región con su valor de correlación)
6. Volver al listado realizado en 3) para verificar las unidades espaciales residuales e ir enganchándolas a los pares recíprocos. Envolver los grupos (regiones) y numerarlos.
7. Mapear los grupos (o regiones) y obtener su matriz de especificidad. La matriz de especificidad se obtiene promediando para cada variable los valores de las filas que corresponden a las UE que conforman el par recíproco núcleo del grupo (o región).
8. Si se requiere obtener un segundo nivel de agrupamiento, tomar a la matriz de especificidad como datos de entradas y a los grupos como UE y volver al paso 1) para obtener regiones.

Con este procedimiento se obtuvieron 22 grupos de departamentos. Con el objetivo de contar con un menor número de regiones, se repitió el procedimiento.



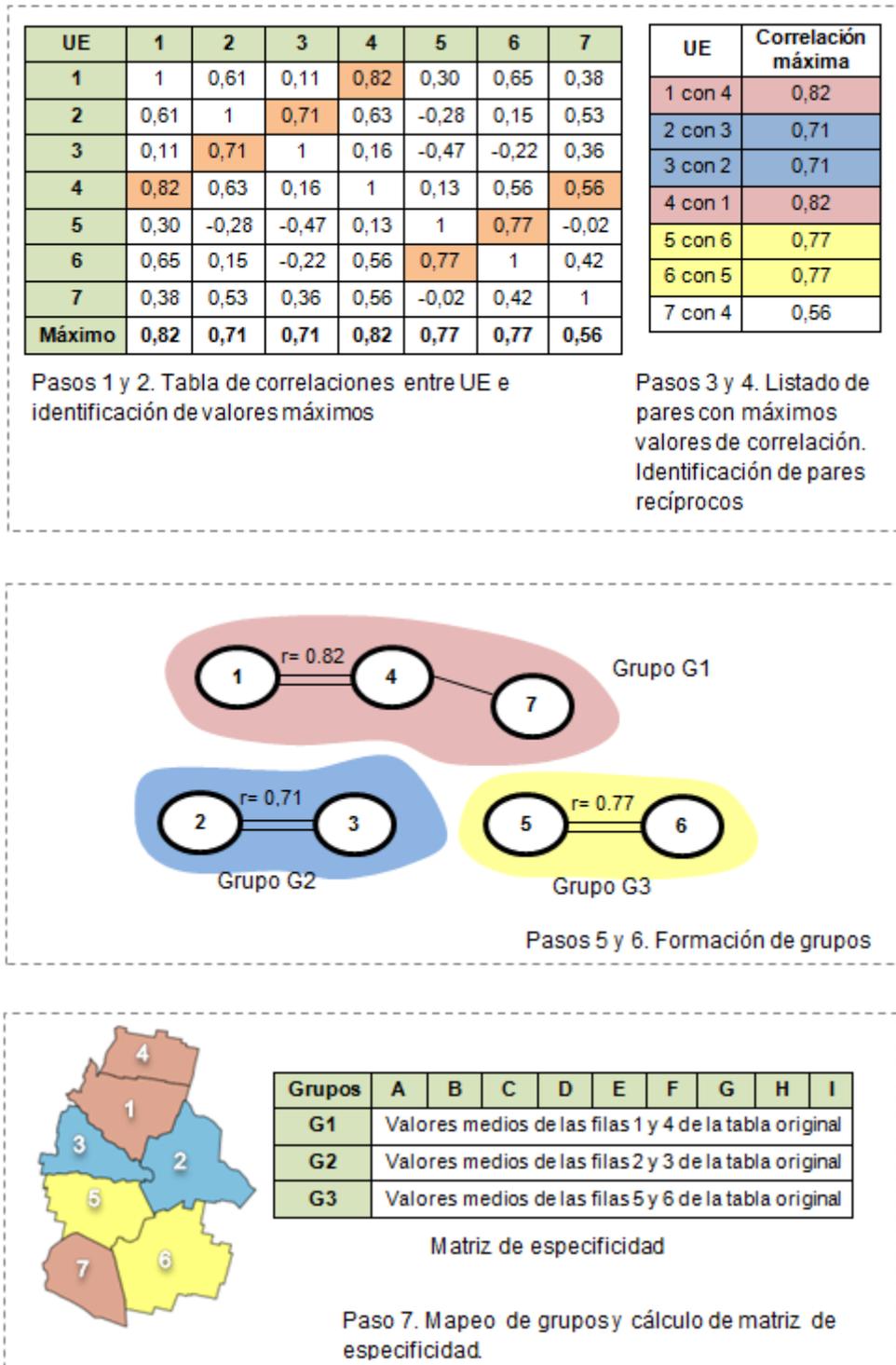


Figura 2.3. Esquema metodológico ilustrativo del análisis de encadenamiento utilizado para obtener la zonificación socio-habitacional. UE significa unidades espaciales.

Este procedimiento permitió conformar 6 regiones socio-habitacionales (Figura 2.8, tabla 2.5). Una vez obtenidas las 6 regiones se realizó la caracterización de las regiones a partir de la matriz de especificidad (Tablas A.2 a A.9, Apéndice A), la cual contiene valores normalizados de las variables y se interpretan según las categorías de la Tabla 2.6.

Se generó un script de R, que fue ejecutado desde las herramientas de Procesamiento de QGIS.

Tabla 2.5. Regiones socio-habitacionales obtenidas a través del procedimiento análisis de encadenamiento en un segundo nivel de agrupamiento y valores de correlación de las unidades que conformaron el par recíproco, núcleo de la región.

Región	Correlación
1	0,53
2	0,72
3	0,89
4	0,77
5	0,86
6	0,79

Tabla 2.6. Categorías asignadas a los rangos de valores de la matriz de especificidad

Valor	Categoría
>1,5	Muy alto (muy superior a la media)
Entre 0,5 y 1,5	Alto (superior a la media)
Entre -0,5 y 0,5	Medio (cercano a la media)
Entre -1,5 y -0,5	Bajo (inferior a la media)
<-1,5	Muy bajo (muy inferior a la media)

Un proceso de OT debe definir el desarrollo y la distribución de infraestructura productiva y social, promoviendo una distribución más balanceada de la población en todo el territorio de la Nación (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2012). Para analizar la estructura y funcionamiento del territorio, un equipo multidisciplinario del Programa Nacional de Ecorregiones de INTA (INTA, 2012), seleccionó dos índices que permiten visualizar la distribución de la población y las posibilidades de transporte que permitan interconectarlas: el índice de suficiencia ferroviaria y el índice de distribución espacial de los asentamientos de la población. En este trabajo se adoptaron particularmente porque para su obtención se consideran la infraestructura ferroviaria, las superficies de los departamentos, la cantidad de habitantes, las distancias, el número de localidades; lo cual le otorga mayor potencial de síntesis e interpretabilidad a los resultados.

Índice de suficiencia ferroviaria (índice de Engel)

El índice de suficiencia ferroviaria de Engel, representa la capacidad de la red ferroviaria para garantizar los servicios de conexión para la población (Palacio-Prieto et al., 2004). Se tomaron los datos de departamentos, red vial, red ferroviaria y centros poblados del SIG-250 (IGN, 2012) y los datos de cantidad de habitantes por departamentos del Censo Nacional de población, hogares y viviendas (INDEC, 2011). El índice se calcula a partir de la ecuación 2.2.

$$IndEng = \frac{Km_Pav_Ferr}{\sqrt{(Km^2_dpto * Pob_dpto)}} * 100 \quad (2.2)$$

Donde:

IndEng es el índice de suficiencia ferroviaria.

Km_Pav_Ferr son los kilómetros lineales de rutas nacionales y provinciales pavimentadas y vías de ferrocarriles activos de pasajeros, por departamento.

Km²_dpto es la superficie en Km² del departamento.

Pob_dpto es la cantidad de habitantes del departamento

El índice presenta valores bajos cuando la infraestructura ferroviaria está saturada y no hay buena oferta de caminos pavimentados y ferrocarril de pasajeros, y presenta valores altos cuando hay buena oferta de infraestructura ferroviaria para la población. El índice de suficiencia ferroviaria se categorizó en 3 clases: Baja: 0 – 3, Media: 3 – 6, Adecuada: 6 – 10.

Distribución espacial de los asentamientos de la población (Índice de Clark-Evans)

El índice de distribución espacial de asentamientos de Clark-Evans, relaciona el número de localidades (no consideramos caseríos, ni parajes) y la distancia entre ellas, con respecto a la superficie total del departamento (Palacio-Prieto et al., 2004).

Representa la aleatoriedad, la uniformidad o la concentración de la distribución de las poblaciones en el departamento. El supuesto es que una distribución homogénea de poblaciones favorece una ocupación espacial equilibrada y su desarrollo económico. El índice se calcula a partir de la ecuación 2.3.

$$Ind_Clark_Evans = 2 * d * \sqrt{\frac{N}{Km^2_dpto}} \quad (2.3)$$

Donde:

Ind_Clark_Evans es el índice de Clark-Evans de ocupación espacial de los asentamientos de población.

d es la media de las distancias de las localidades con respecto a la más próxima en el departamento, en kilómetros.

N es el número de localidades en el departamento

Km²_dpto es la superficie en Km² del departamento.

Valores nulos indican población totalmente concentrada, valores cercanos a la unidad indican distribución aleatoria de la población. Valores superiores a la unidad indican distribuciones más regulares que al llegar al valor 2,15 representan distribuciones completamente regulares u homogéneas. El índice de distribución de asentamientos de la población se estratificó en 3 categorías: Concentrada: 0 - 0,7, Aleatoria: 0,71 – 1,3, Regulares u homogéneas: 1,3 – 2,3.

2.2.3. Zonificación político-institucional

Para la componente político-institucional se consideraron los límites departamentales (IGN, 2012), los parques nacionales, provinciales y municipales, las áreas de reserva de biosfera, los monumentos naturales y las concesiones mineras (Morales Ponclava et al., 2012).

2.3. Resultados

Se creó una base de datos geográfica de postgis con los datos básicos considerados en el análisis y los resultados alcanzados en el proceso (ver Apéndice A). Se generaron scripts de R y python que permitieron ejecutar los procedimientos en el entorno de QGIS (Apéndice B).

Se obtuvieron la regionalización biofísica (Figura 2.7), la socio-económica (Figura 2.11) y la político-institucional (Figura 2.12). Como parte del proceso metodológico se obtuvieron resultados intermedios que alimentan la base de datos y permiten caracterizar el territorio, tales como:

- La zonificación bioclimática, diferenciando 5 zonas a partir del ACP de 19 variables bioclimáticas (Figura 2.4).
- Mapa de pendientes (Figura 2.5)
- Mapa de tipos de suelos (Figura 2.6).
- Zonificación socio-habitacional (Figura 2.8) a partir de datos del Censo Nacional de Población y Vivienda del 2010 que diferencia 6 regiones y las caracteriza a través de puntajes medios de las variables consideradas. Las tablas A.2 a A.9 del Apéndice A sintetizan las condiciones demográficas, de habitabilidad, de distribución de la población en zonas urbanas rurales, de educación, de régimen de tenencia de la vivienda, de infraestructura de servicios, de calidad constructiva de la vivienda, de calidad de conexión a servicios y necesidades básicas insatisfechas, respectivamente; a través de colores asociados a rangos de valores de las variables.
- Mapa de suficiencia ferroviaria, clasificado en tres categorías: Baja: 0 – 3, Media: 3 – 6, Adecuada: 6 – 10 (Figura 2.9)
- Mapa de distribución espacial de la población, clasificado en tres categorías: Concentrada, aleatoria, regular u homogénea (Figura 2.10).

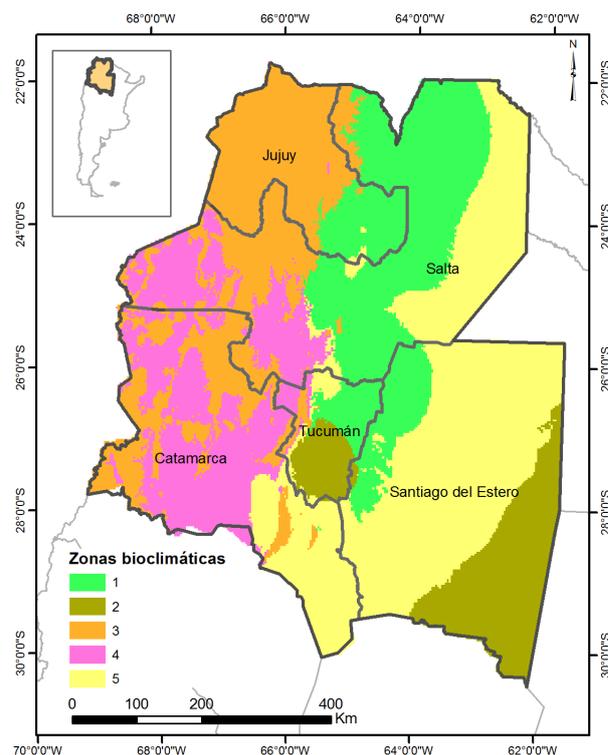


Figura 2.4. Zonificación bioclimática del NOA obtenida a partir de variables bioclimáticas de WorldClim. Las zonas 1 a 5 representan zonas bioclimáticas homogéneas en términos de las variables bioclimáticas de Worldclim.

Tabla 2.7. Valores medios de las variables bioclimáticas para cada una de las zonas.

Zona	N° celdas	Temperatura mínima del mes más frío (bio6)	Temperatura promedio en el trimestre más seco (bio9)	Temperatura promedio en el trimestre más frío (bio11)	Precipitación anual (bio12)	Precipitación en el mes más lluvioso (bio13)	Precipitación en el mes más seco (bio14)	Precipitación en el trimestre más lluvioso (bio16)	Precipitación en el trimestre más seco (bio17)	Precipitación en el trimestre más caluroso (bio18)	Precipitación en el trimestre más frío (bio19)
1	10897	6	15	14	754	156	3	424	420	16	17
2	5322	6	14	14	793	125	13	350	344	50	51
3	11313	-8	2	1	144	39	1	98	98	4	6
4	8085	-2	7	6	124	33	1	84	83	4	6
5	16575	7	15	15	588	112	5	301	299	21	24

Las zonas 3 y 4 se encuentran comprendidas, según la clasificación climática de Köppen, en el clima de altura, la zona 1 se superpone con la zona de climas templados secos en invierno, la zona 2 está asociada a los climas templados húmedos y la zona 5 coincide con los climas esteparios (semiáridos).

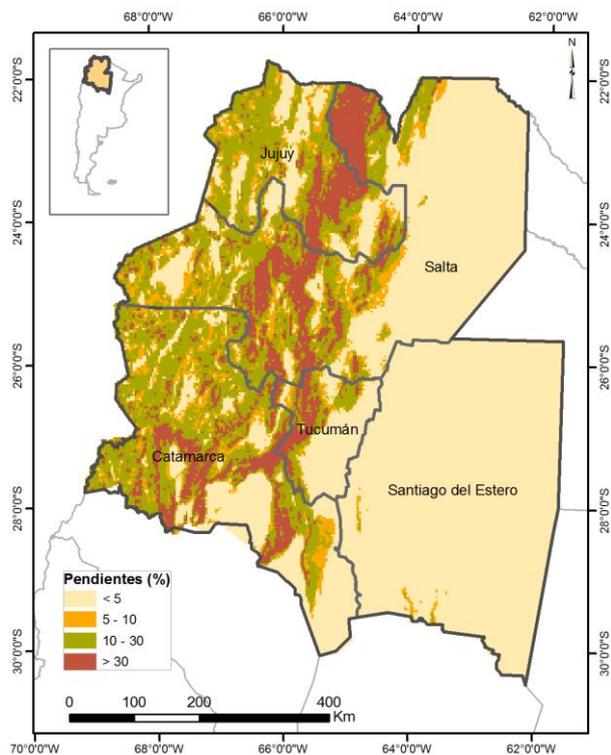


Figura 2.5. Pendientes expresadas en porcentajes, reclasificadas en 4 categorías (Adaptado de FAO, 2009): 3.Tierras a nivel (pendientes menores a 5%), 2.Tierras de pendiente ligera (pendientes entre 5 y 10%), 1.Tierras con pendiente moderada (pendientes entre 10 y 30%) y 0.Tierras escarpadas (pendientes mayores a 30%)

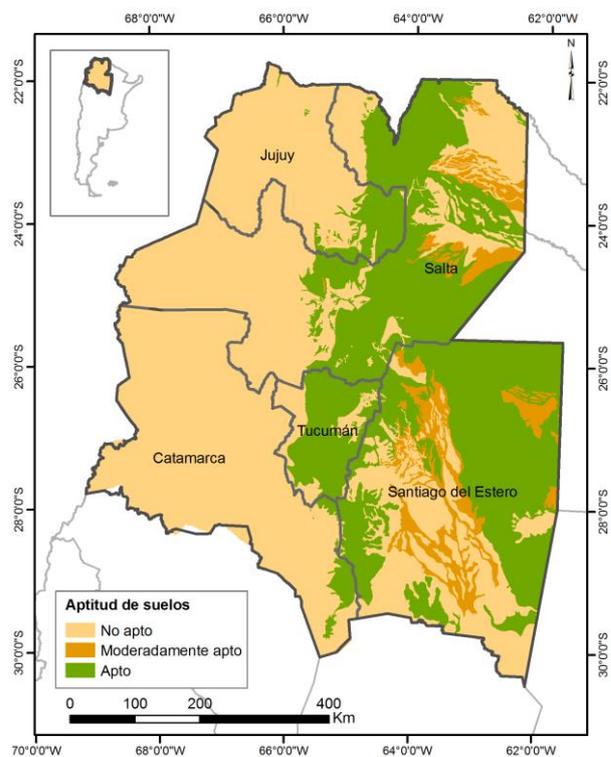


Figura 2.6. Unidades cartográficas de suelos reclasificadas según sus suelos dominantes en 3 categorías: 0.No apto, 1.Moderadamente apto y 2.Apto

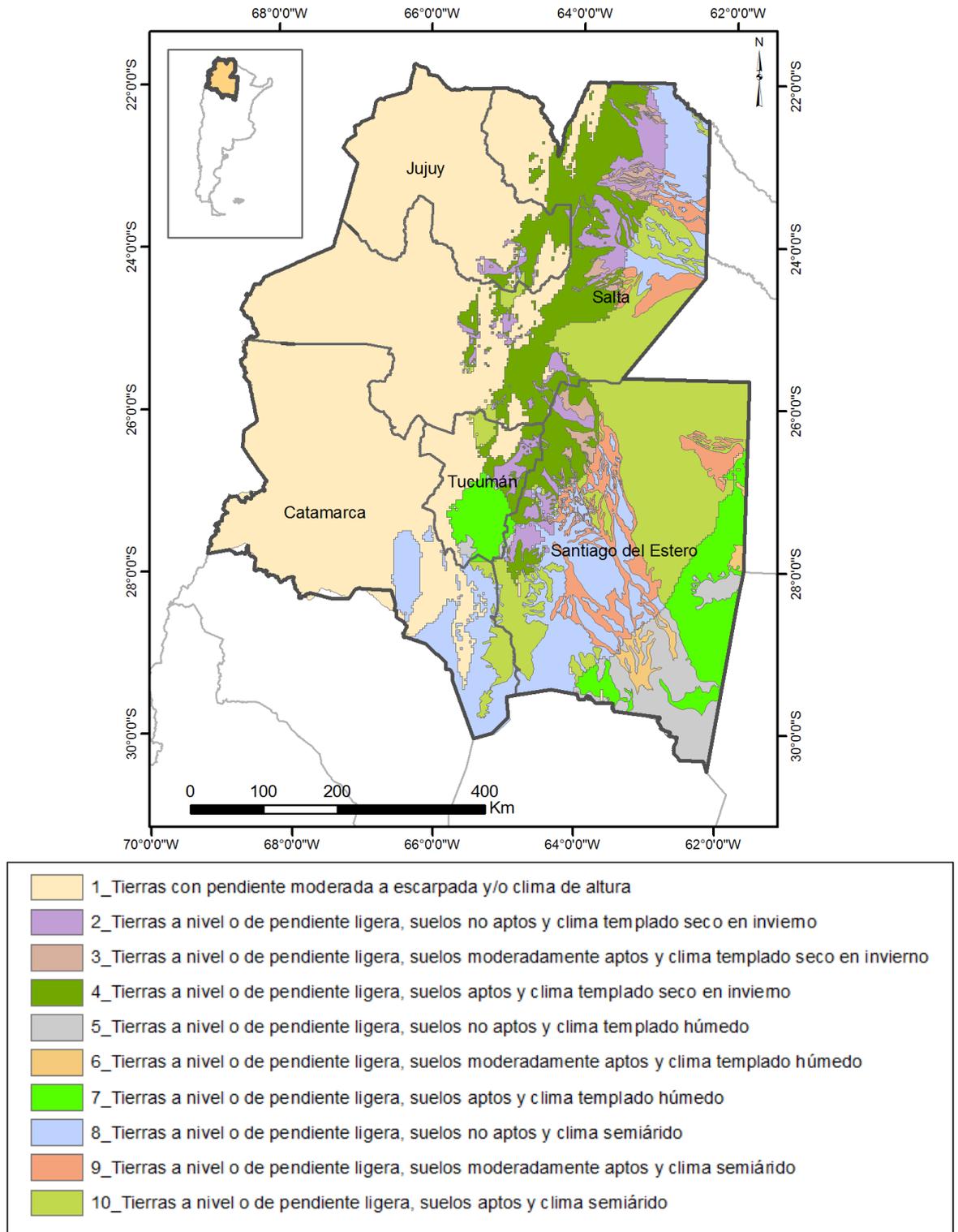
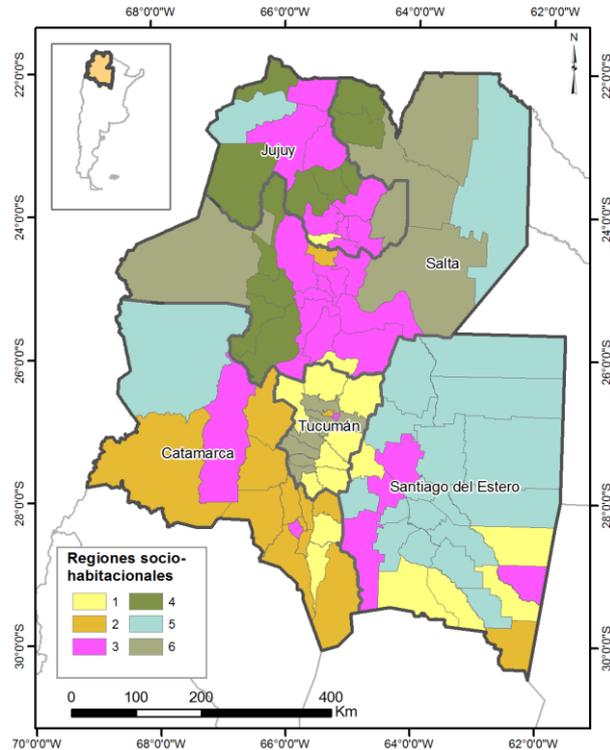


Figura 2.7. Zonas biofísicas derivadas de la superposición de las zonas bioclimáticas (Figura 2.3), mapa de pendientes recategorizadas (Figura 2.4) y unidades cartográficas de suelos reclasificadas (Figura 2.5).



- Región 1. NBI cercano a la media con servicios insuficientes.
 Región 2. NBI inferior a la media con servicios básicos.
 Región 3. NBI inferior a la media con deficiencias en tenencia de la vivienda.
 Región 4. NBI superior a la media, con deficiencias en condiciones educacionales, de habitabilidad y de servicios.
 Región 5. NBI muy superior a la media con deficiencias en condiciones educacionales, de habitabilidad y de servicios. Hacinamiento muy alto.
 Región 6. NBI cercano a la media con servicios satisfactorios.

Figura 2.8. Regiones socio-habitacionales obtenidas a través de procedimiento de análisis de encadenamiento. Las regiones 1 a 6 representan zonas homogéneas en términos de condiciones socio-habitacionales de la población.

Como características relevantes de las regiones se destaca:

La región 1 se caracteriza por tener:

- índice de dependencia potencial cercano a la media,
- viviendas en área urbana inferior a la media, viviendas en área rural dispersa superior a la media,
- hacinamiento cercano a la media,
- población con solo nivel primario alcanzado muy superior a la media, tasa de analfabetismo cercano a la media,
- propietarios de viviendas superior a la media e inquilinos inferior a la media,
- viviendas que presentan materiales poco resistentes y sólidos en techo y en pisos, superior a la media, viviendas con servicios insuficientes (sin suministro de agua de red y sin descarga a red pública) superior a la media,
- población y hogares con necesidades básicas insatisfechas cercanos a la media.

La región 2 se caracteriza por tener:

- índice de dependencia potencial inferior a la media,

- hacinamiento inferior a la media,
- viviendas en área urbana superior a la media, viviendas en área rural agrupada y dispersa inferior a la media,
- población con nivel secundario, terciario, universitario y postuniversitario alcanzado muy superior a la media, tasa de analfabetismo inferior a la media,
- propietarios, inquilinos y ocupantes de viviendas cercanos a la media,
- viviendas que presentan materiales resistentes y sólidos en techo y en pisos, superior a la media, viviendas con servicios básicos (con suministro de agua de red y con descarga a red pública) superior a la media,
- población y hogares con necesidades básicas insatisfechas inferiores a la media.

La región 3 se caracteriza por tener:

- índice de dependencia potencial inferior a la media,
- hacinamiento cercano a la media,
- viviendas en área urbana inferior a la media, viviendas en área rural agrupada y dispersa inferior a la media,
- población con nivel secundario, terciario, universitario y postuniversitario alcanzado superior a la media, tasa de analfabetismo inferior a la media,
- propietarios de viviendas cercanos a la media e inquilinos muy superior a la media,
- viviendas que presentan materiales resistentes y sólidos en techo y en pisos superior a la media, viviendas con servicios satisfactorios (con suministro de agua de red y con descarga a red pública) superior a la media,
- población y hogares con necesidades básicas insatisfechas inferiores a la media.

La región 4 se caracteriza por tener:

- índice de dependencia potencial muy superior a la media,
- hacinamiento cercano a la media,
- viviendas en área urbana muy inferior a la media, viviendas en área rural agrupada y dispersa superior a la media,
- población con nivel primario, secundario, terciario y universitario alcanzado inferior a la media, tasa de analfabetismo muy superior a la media,
- propietarios, inquilinos y ocupantes cercanos a la media,
- viviendas que presentan materiales resistentes y sólidos en techo y en pisos muy inferior a la media, viviendas que presentan materiales de baja calidad en pisos y techos superior a la media, viviendas con servicios insuficientes (sin suministro de agua de red y sin descarga a red pública) superior a la media,
- población y hogares con necesidades básicas insatisfechas superiores a la media.

La región 5 se caracteriza por tener:

- índice de dependencia potencial muy superior a la media,
- hacinamiento muy superior a la media,
- viviendas en área urbana inferior a la media, viviendas en área rural dispersa superior a la media,
- población con nivel secundario, terciario, universitario y postuniversitario alcanzado inferior a la media, tasa de analfabetismo superior a la media,
- propietarios superiores a la media, inquilinos y ocupantes inferiores a la media,

- viviendas que presentan materiales resistentes y sólidos en techo y en pisos inferior a la media, viviendas con servicios insuficientes (sin suministro de agua de red y sin descarga a red pública) superior a la media,
- población y hogares con necesidades básicas insatisfechas superiores a la media.

La región 6 se caracteriza por tener:

- índice de dependencia potencial inferior a la media,
- hacinamiento cercano a la media,
- viviendas en área urbana superior a la media, viviendas en área rural agrupada inferior a la media,
- población con nivel primario, secundario, terciario, universitario y postuniversitario alcanzado cercano a la media, tasa de analfabetismo inferior a la media,
- propietarios, inquilinos y ocupantes cercanos a la media,
- viviendas que presentan materiales resistentes y sólidos en techo y en pisos superior a la media, viviendas con servicios satisfactorios (con suministro de agua de red y con descarga a red pública) superior a la media,
- población y hogares con necesidades básicas insatisfechas cercanos a la media.

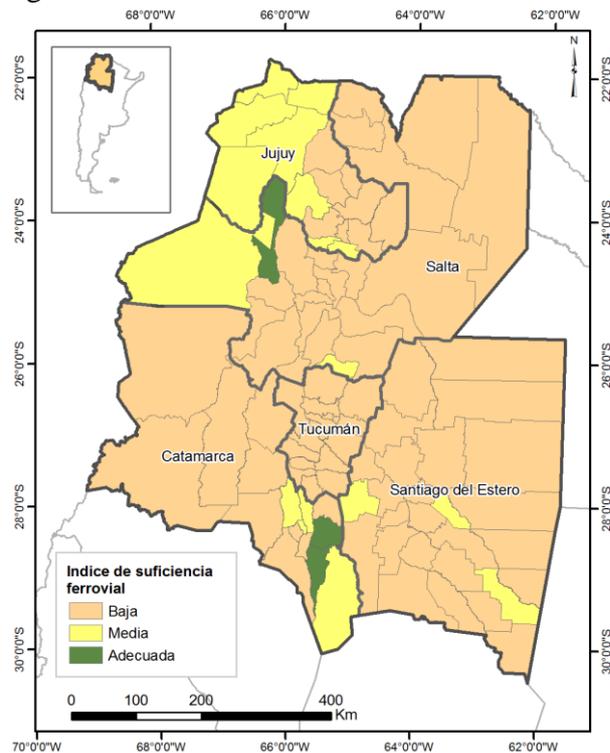


Figura 2.9. Índice de suficiencia ferroviaria clasificado en tres categorías: Baja, Media, Adecuada

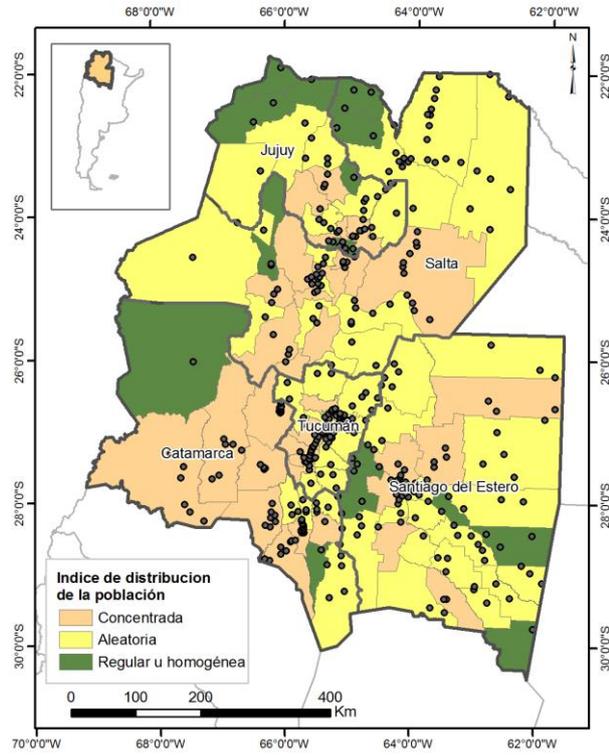
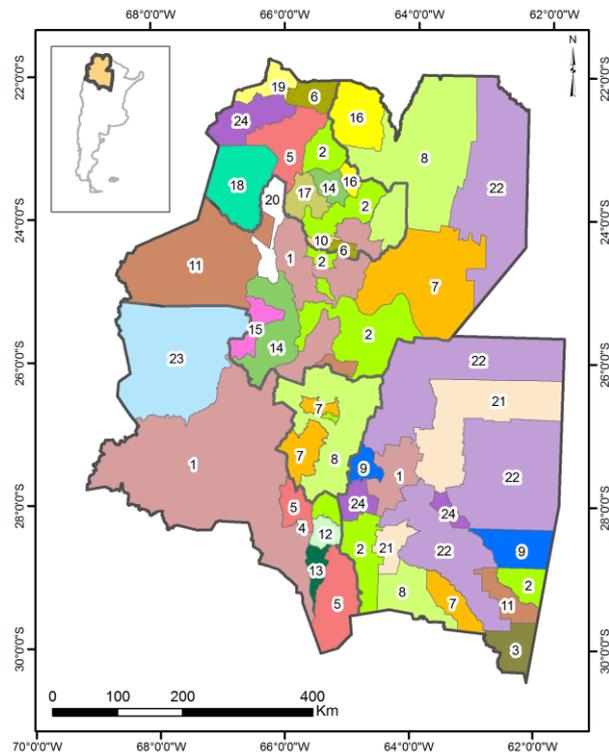


Figura 2.10. Índice de Distribución espacial de los asentamientos de la población (Índice de Clark-Evans): Concentrada, aleatoria, regular u homogénea. Los puntos muestran la ubicación de los asentamientos considerados.



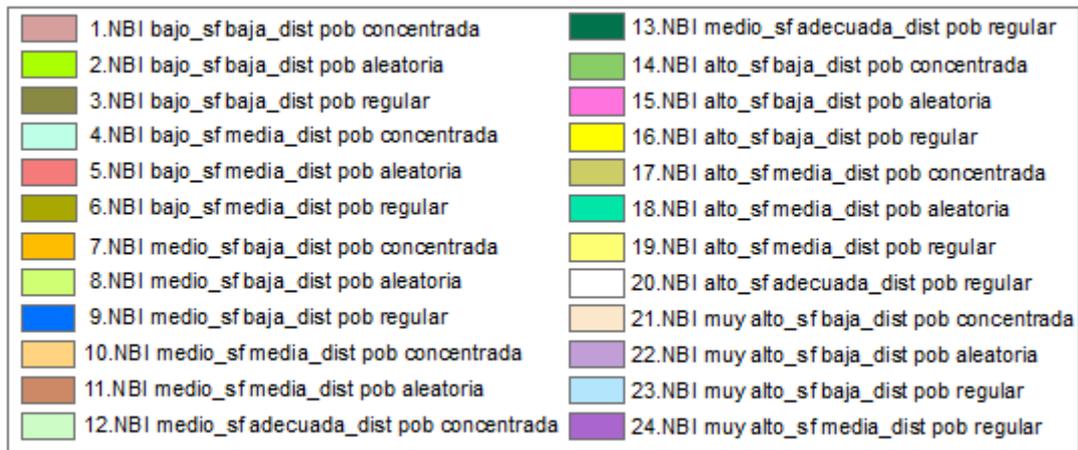


Figura 2.11. Zonas socio-económicas derivadas de la superposición de las regiones socio-habitacionales (Figura 2.8), mapa de suficiencia ferroviaria (Figura 2.9) y mapa de distribución espacial de los asentamientos de la población (Figura 2.10). “NBI” significa necesidades básicas insatisfechas, “sf” significa suficiencia ferroviaria, “dist pob” significa distribución de la población.

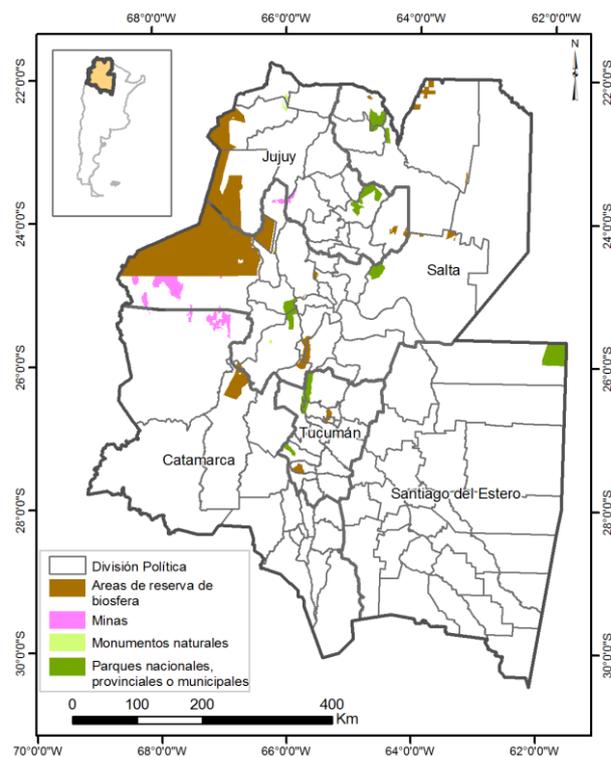


Figura 2.12. Zonificación político-institucional

2.4. Discusión y conclusiones

2.4.1. A cerca de los resultados

El objetivo del diagnóstico es el conocimiento integral del territorio. El diagnóstico busca la recopilación e interpretación de la información clave que permita conocer las potencialidades y limitaciones del sistema territorial y ayude a comprender los procesos territoriales actuales y sus tendencias de cambio (Méndez Casariego y Pascale Medina, 2014). Esta etapa proveyó los insumos necesarios para la generación de

escenarios futuros de conformación del territorio permitiendo el diseño de políticas, planes y proyectos.

La información cuantitativa obtenida a partir de las zonificaciones parciales realizadas con subconjuntos de variables representa un insumo útil para la toma de decisiones a nivel regional y/o provincial y proveerá el marco para un análisis a escala municipal o departamental.

Zonificación biofísica

Las regiones obtenidas a partir de variables biofísicas pueden ser consideradas como unidades ambientales funcionales, para la planificación a escala regional de algunos aspectos que el OTR debe definir: la distribución en el espacio y en el tiempo de las actividades productivas; el acceso y usufructo de bienes y servicios provistos por los ecosistemas destinados tanto a la producción como a la conservación; el monitoreo de los recursos naturales y de los factores de degradación y/o contaminación; las necesidades de generación de alternativas de uso y valorización del territorio (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2012)

En este trabajo se diferenciaron cuatro zonas bioclimáticas principales: el 37% de la superficie del NOA se asocia a los climas de altura, el 32% al semiárido, el 21% al templado seco en invierno y el 10% al clima templado húmedo. Las superficies de las zonas, por provincias se muestra en la Figura 2.13.

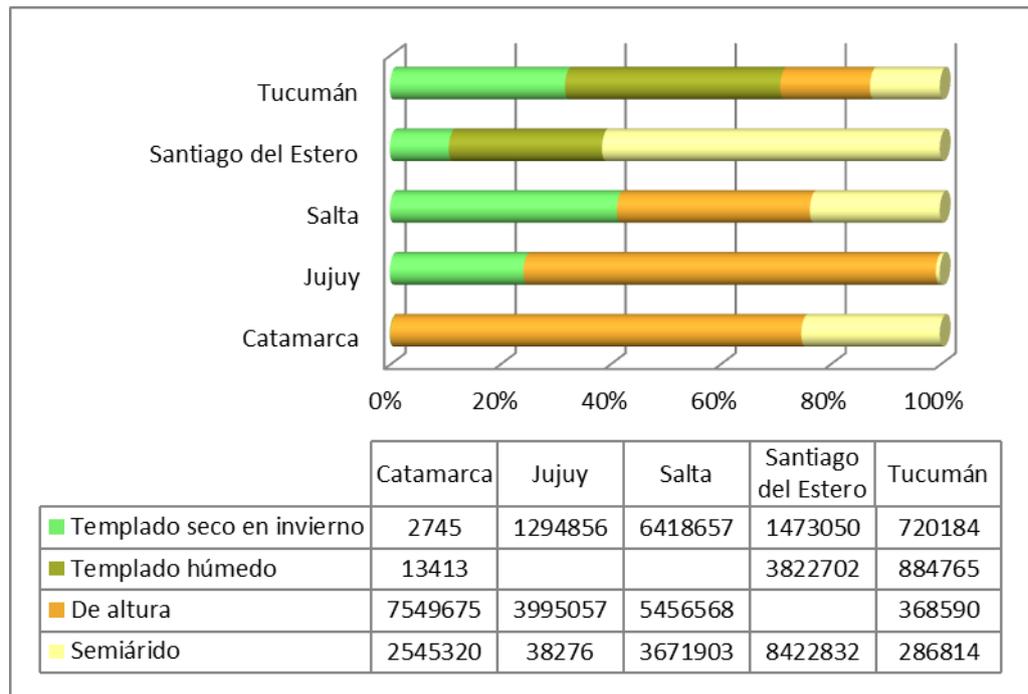


Figura 2.13. Superficies de zonas bioclimáticas por provincias (en hectáreas)

Se obtuvieron las superficies de suelos por clases de aptitud para uso agropecuario. En el NOA, el 35% de los suelos fueron clasificados como aptos, el 6% como marginalmente aptos y el 59% como suelos no aptos. Las superficies de aptitud de suelos, por provincia se muestra en la Figura 2.14.

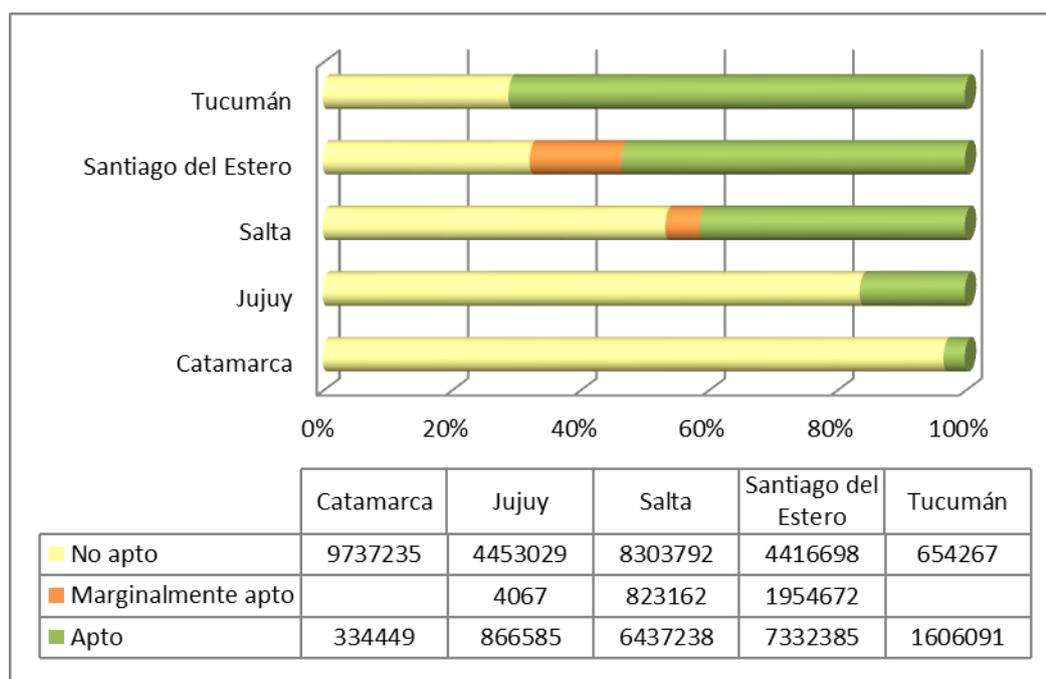


Figura 2.14. Superficies de suelos según aptitud para uso agropecuario más frecuente del suelo dominante del Gran Grupo por provincias (en hectáreas)

Se cuantificaron las superficies de suelos por pendientes en el NOA: el 58% corresponde a la categoría Tierras a nivel, el 23% son Tierras de pendiente moderada, el 11% son Tierras escarpadas y el 7% Tierras de pendiente ligera. Las superficies de las categorías de pendientes, por provincia se muestra en la Figura 2.15.

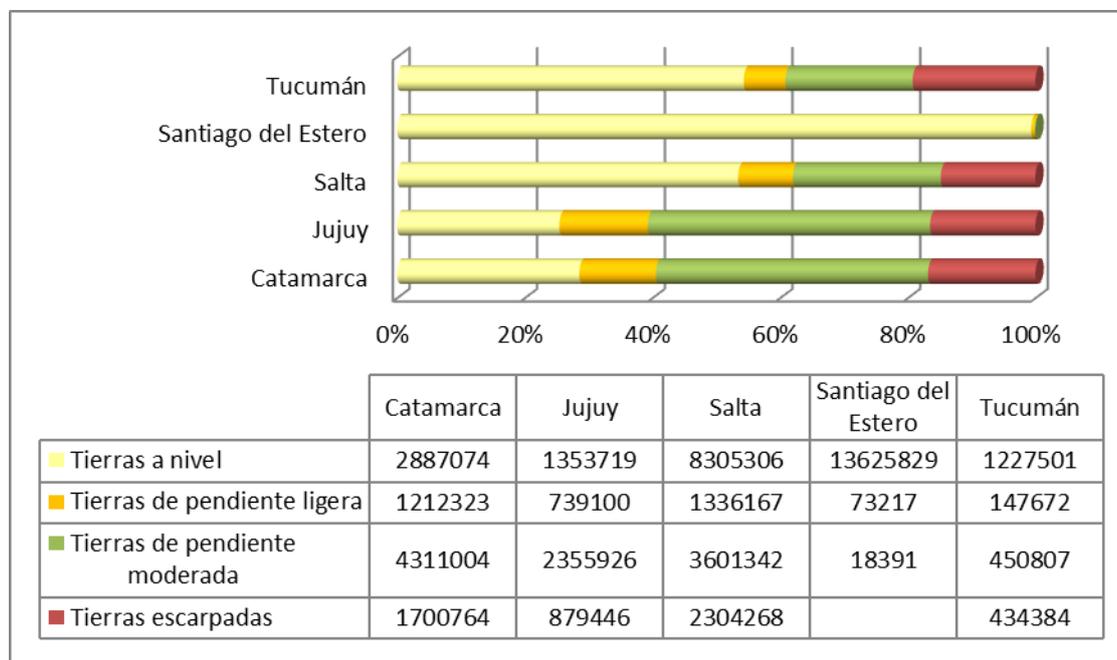


Figura 2.15. Superficies de suelos, según sus pendientes por provincias (en hectáreas)

Zonificación socioeconómica

Las regiones socioeconómicas resultantes, constituyen espacios homogéneos que pueden utilizarse como punto de partida para la focalización de intervenciones relacionadas con la educación, salud, acceso a servicios básicos, vivienda e

infraestructura para el desarrollo de la región. Esta zonificación aporta información para el desarrollo y la distribución de infraestructura productiva y social, promoviendo una distribución más balanceada de la población en el territorio, otro de los aspectos que el OTR debe contemplar (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2012)

Las tablas 2.8 a 2.10 muestran algunos desequilibrios en las condiciones de vida en lo que se refiere a deficiencias educacionales, de vivienda y de infraestructura de servicios. Las Figuras 2.16 y 2.17 muestran la cantidad de departamentos por provincias clasificados según la capacidad de la red ferroviaria para garantizar los servicios de conexión para la población, y según la distribución espacial de estos asentamientos.

Tabla 2.8. Variables socioeconómicas por provincias. POBLACION – Cantidad de habitantes, POB_CAP – Población que vive en el Departamento capital de cada provincia, HACIN - Hacinamiento crítico, más de 3 personas por cuarto, TASA_ANALF - Tasa de analfabetismo.

PROVINCIA	POBLACION	HOGARES	POB_CAP(%)	HACIN(%)	TASA_ANALF(%)
Catamarca	367828	96001	43	5	2
Jujuy	673307	174630	39	7	3
Salta	1214441	299794	44	9	3
Santiago del Estero	874006	218025	31	8	4
Tucumán	1448188	368538	38	6	2

Tabla 2.9. Variables socioeconómicas por provincias. PROPIET – Propietario, INQUIL – Inquilino, OCUPANT- Ocupante por préstamo o trabajo, CON_SERV_SATIS - refiere a las viviendas que disponen de agua a red pública y desagüe cloacal, CON_SERV_BAS - describe la situación de aquellas viviendas que disponen de agua de red pública y el desagüe a pozo con cámara séptica, CON_SERV_INSUF - engloba a las viviendas que no cumplen ninguna de las 2 condiciones anteriores.

PROVINCIA	PROPIET(%)	INQUIL(%)	OCUPANT(%)	CON_SERV_SATIS(%)	CON_SERV_BAS(%)	CON_SERV_INSUF(%)
Catamarca	84	8	8	43	32	25
Jujuy	76	11	13	61	12	27
Salta	76	12	12	61	11	29
Santiago del Estero	89	4	7	22	30	49
Tucumán	82	9	10	46	19	35

Tabla 2.10. Variables socioeconómicas por provincias. POB_NBI - Población con Necesidades Básicas Insatisfechas, HOG_NBI - Viviendas con Necesidades Básicas Insatisfechas.

PROVINCIA	POB_NBI(%)	HOG_NBI(%)
Catamarca	14	11
Jujuy	18	15
Salta	23	19
Santiago del Estero	23	18
Tucumán	16	13

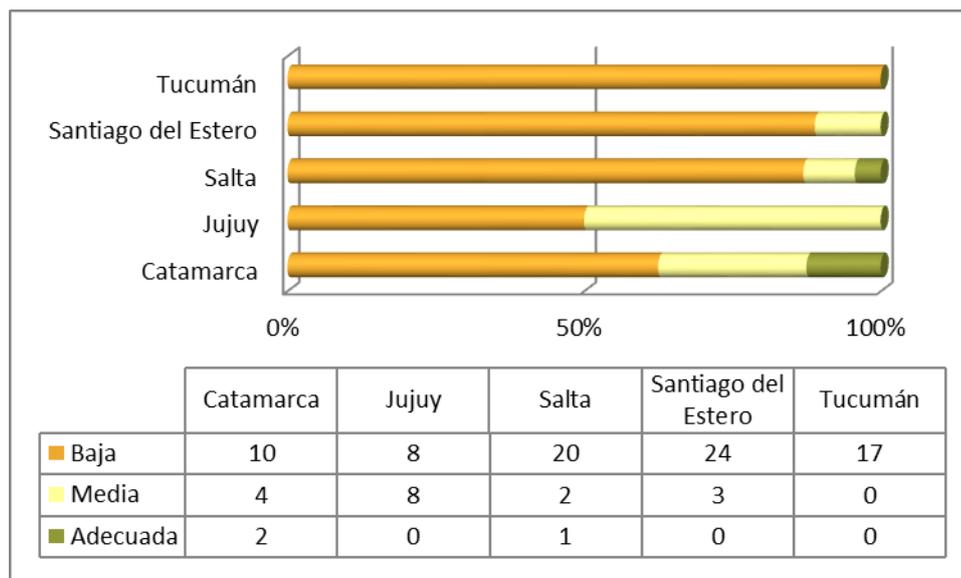


Figura 2.16. Cantidad de departamentos por provincias, categorizados según el índice de suficiencia ferroviaria.

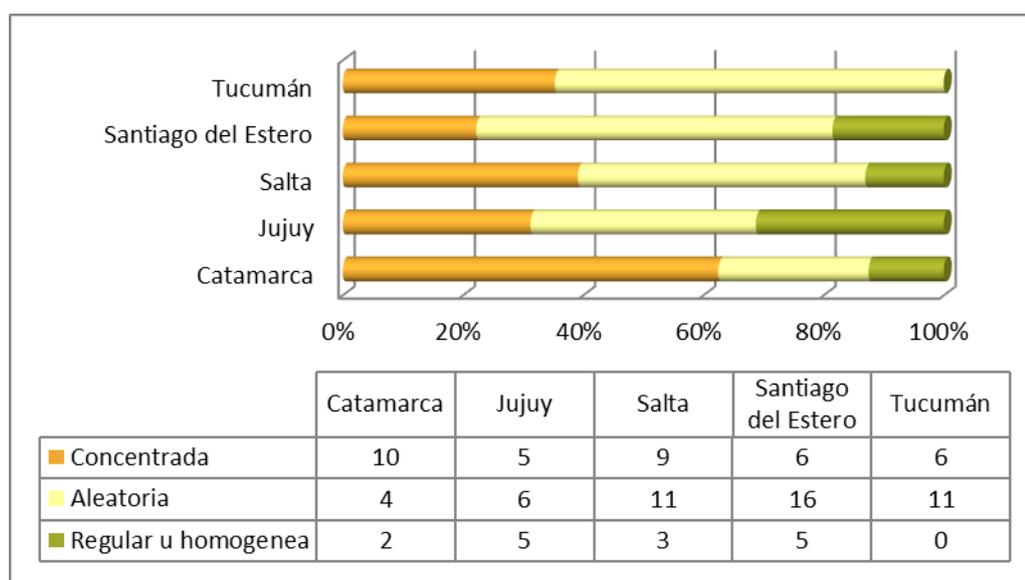


Figura 2.17. Cantidad de departamentos por provincias, categorizados según la distribución espacial de la población.

Zonificación política-institucional

La zonificación político-institucional integra los límites políticos administrativos provinciales y departamentales, por ser el ordenamiento territorial una función indelegable del estado en el nivel que corresponda (departamental, provincial, nacional). Se incorporaron también los parques nacionales, provinciales y municipales, las áreas de reserva de biosfera, los monumentos naturales y las concesiones mineras, como datos para analizar la distribución y régimen de uso de las áreas protegidas, restringidas y/o de uso público, otro de los aspectos que el OTR debe definir (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2012)

Las regiones identificadas sirven de base para la planificación a escala regional, con el objetivo de favorecer la articulación y armonización entre los planes de desarrollo de los diferentes niveles de gobierno (nacional, provincial y departamental).

La Guía Metodológica de Ordenamiento Territorial en el Municipio sugiere realizar un análisis FODA (fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas) de las diferentes zonas (unidades básicas de análisis) que permita integrar los aspectos biofísicos, socioeconómicos y político-institucionales (Mendez Casariego y Pascale Medina, 2014)

2.4.2. Acerca de la metodología

La metodología permitió condensar variables socio-económicas, biofísicas y político-institucionales generando zonas o regiones caracterizadas por un gran número de atributos que sintetizan las potencialidades y limitaciones del espacio a ordenar y, que se deben considerar en las fases posteriores del proceso de OT.

La utilización de diferentes técnicas para la obtención de las zonificaciones, contribuye al objetivo general de esta tesis, al mostrar como a través de diferentes metodologías basadas en la agrupación de variables y de unidades espaciales en base a datos estadísticos, se ponen en evidencia las heterogeneidades espaciales internas del área de estudios. Por otra parte, el análisis multivariado es frecuentemente utilizado en estudios biofísicos – ecológicos, mientras que el análisis de encadenamiento es principalmente aplicado desde la rama de las ciencias sociales. En el caso de zonificación político – institucional, debido a que sólo se consideraron áreas restringidas por legislación y límites políticos, no fue necesario hacer un análisis multivariado y se optó por la superposición de capas. De esta manera se deja a criterio del equipo técnico involucrado en el OT, la selección de la metodología más apropiada para la región.

Respecto al criterio de seleccionar las variables bioclimáticas con coeficiente de variación superior al 50% para obtener la zonificación bioclimática, siguiendo la metodología utilizada por Berdegú (1990) y Paz et al. (2003), cabe aclarar que el equipo técnico en base al análisis de los datos, puede modificar este umbral, aplicar otro criterio de selección e inclusive optar por incluir todas las variables en el análisis de componentes principales. El SADE permite repetir el proceso con distintos conjuntos de variables, por lo cual no debe considerarse una limitación de la metodología. (Véase Apéndice B)

Se generó una cartografía temática que alimenta la base de datos geográfica del área de estudio, disponible a través de un servicio WMS para ser fácilmente consultable por los actores involucrados en el proceso.

El desarrollo de los scripts incorporados como herramientas de un software libre de SIG mejorará perceptiblemente la capacidad de los gestores del territorio de generar zonificaciones, modificando, si fuera necesario, las variables a considerar en función de los objetivos planteados por los actores.

Por otra parte, los mismos scripts pueden ser usados para zonificar otras regiones del país, lo cual permite unificar metodologías de tratamiento de los datos para obtener resultados comparables y verificables.

El uso de las bases de datos globales, como es el caso de WorldClim, SRTM o nacionales como el caso el SIG-250, los mapas de suelos, o los datos censales permitirá replicar o adaptar con mayor facilidad los procedimientos empleados en otras regiones del país. Los SIG basados en software libre, a partir de la posibilidad de incorporar algoritmos creados por los usuarios, se convierten en herramientas de gran utilidad para el OT.

2.5. Bibliografía

- Berdegú, J., O. Sotomayor & C. Zilleruelo. 1990. Metodología de tipificación de la producción campesina de la provincia de Ñuble, Chile. En: Berdegú y Escobar (ed.). Tipificación de sistemas de producción agrícola. Ed. RIMISP. Santiago de Chile.
- Bravo, G., A. Bianchi, J. Volante, S. Alderete Salas, G. Sempronii, L. Vicini, M. Fernández, H. Lipshitz y A. Píccolo. 2001. Regiones Agroeconómicas del noroeste Argentino; INTA, E.E.A. Salta, E.E.A. Catamarca, E.E.A. Santiago del Estero, A.E.R. Banda del Río Salí, E.E.A. Famaillá. INTA.
- Buzai, G. 2003. Mapas Sociales Urbanos. Lugar Editorial. Buenos Aires.
- Buzai, G., C. Baxendale. 2006. Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica. 1ª Ed. Buenos Aires. Editorial Gepama. 400 p. ISBN 950-892-264-8.
- Cabrera, A. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Segunda edición, ACME, Buenos Aires. 85 p
- CEPAL/CELADE. 2013. Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE), División de Población de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), de las Naciones Unidas (UN), Redatam+SP, <http://censo2010.indec.gov.ar> Consultado Mayo/2013
- CGIAR-CSI, <http://srtm.csi.cgiar.org/>. The CGIAR Consortium for Spatial Information. Consultado 10/10/13
- DIVA-GIS 7.4, <http://www.diva-gis.org/>. Software GIS, desarrollado por Hijmans R.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2009. Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición. Traducido y adaptado al castellano por Ronald Vargas Rojas (Proyecto FAOSWALIM, Nairobi, Kenya-Universidad Mayor de San Simón, Bolivia).
- Ferro, I & R. Barquez. 2014. Patrones de distribución de micromamíferos en gradientes altitudinales del noroeste Argentino. Revista Mexicana de Biodiversidad 85: 472-490.
- Gallopín G. 1982. Una metodología multivariable para la regionalización ambiental-I. Bases Metodológicas. Ecología Argentina N° 7: 161-76.
- Gandini, M. 2005. Zonas homogéneas de la Cuenca del arroyo de Azul: Algunos aspectos de su dinámica analizados usando sensores remotos y SIG. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias Biológicas. Disponible en http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3904_Gandini.pdf Consultado el 15/05/14
- Gazia N., I. Gomez, M. Cross & G.Gallopín. 1982. Una metodología multivariable para la regionalización ambiental. II-Aplicación a la Alta Cuenca del Río Bermejo. Ecología Argentina 7: 127-144.
- GeoINTA, <http://geointa.inta.gov.ar>. Bases de datos geoespaciales de INTA. Consultado 16/07/14

- Godagnone, R. & J. de la Fuente. 2000. Regionalización Ecológica del NOA. Proyecto Integración Sanitaria Regional del Noroeste Argentino. Instituto de Suelos, CIRN INTA Publicado en <http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/05/REGIONALIZACION%20N-ECOLOGICA-DEL-NOA.pdf> consultado 14/07/14
- Hagget, P. 1977. El análisis locacional en la Geografía Humana. Gustavo Gili. Barcelona.
- Hijmans, R., S. Cameron, J. Parra, P. Jones & A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965–1978.
- IGN. 2012. Sistema de Información Geográfica SIG250. Especificaciones Técnicas. Instituto Geográfico Nacional, Buenos Aires, Argentina. Disponible en <http://www.ign.gob.ar/sig250>. Consultado 10/01/2014.
- INDEC. 2011. Censo nacional de población, hogares y Viviendas 2010. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Buenos Aires, Argentina.
- INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina. *Versión Digital Corregida, Revisada y Aumentada (Versión 9.0): G. Cruzate, L. Gomez, M. J. Pizarro, P. Mercuri, S. Banchemo. Disponible en <http://geointa.inta.gob.ar>* Consultado 10/01/2014.
- INTA. 2012. Indicadores para el ordenamiento del uso agropecuario y forestal en Argentina. Programa Nacional de Ecorregiones. Inédito.
- Jiménez, A. 2009. Regionalización de Honduras: Hacia la construcción de regiones-plan a través del análisis espacial cuantitativo. Capítulo 19. En Buzai (Ed.), *Geografía y Sistemas de Información Geográfica: Aspectos conceptuales y aplicaciones*. GESIG - Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-05-7535-1.
- Kaiser, H. 1958. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 23: 187-200.
- Legendre, P. & L. Legendre. 1998. *Numerical Ecology*, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam.
- McQuitty, L. 1957. Elementary Linkage Analysis for Isolating Orthogonal and Oblique Types and Typal Relevancies. *Educational and Psychological Measurement*. 17:207-229.
- Méndez Casariego, H & C. Pascale Medina. 2014. *Ordenamiento Territorial en el Municipio: una guía metodológica*. FAO. Santiago, Chile. 72 pp.
- Mendoza, E. & J. González. 2011. Las ecorregiones del Noroeste Argentino basadas en la clasificación climática de Koppen. Serie Conservación de la Naturaleza N° 19. Fundación Miguel Lillo, Tucumán.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2012. *Bases para el Ordenamiento del Territorio Rural Argentino*. Ed. Minagri.

- Morales Poclava, M., L. Lizarraga, H. Elena, Y. Noé, J. Mosciaro, L. Vale, H. Paoli, y J. Volante. 2012. Uso del suelo en el noroeste argentino (NOA) mediante Land Cover Classification System (LCCS-FAO) - Año 2007. Inedito.
- Paz, R., H. Lipshitz, R. Álvarez & P. Usandivaras. 2003. Diversidad y Análisis económico en los sistemas de producción lecheros caprinos en el área de riego del Río Dulce-Santiago del Estero-Argentina. ITEA Vol. 99 A N° 1. Pág. 10-40.
- Palacio-Prieto, J., M. Sanchez-Salazar, J. Casado Izquierdo, E. Propin Frejomil, J. Delgado Campos, A. Velazquez Montes, L. Chias Becerril, M. Ortiz Alvarez, J. Gonzalez Sanchez, G. Negrete Fernandez et al. 2004. Indicadores para la caracterización y el ordenamiento territorial. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Geografía Secretaría de Desarrollo Social. 161 p. ISBN 970-32-1885-7
- Racine, J. & H. Reymond. 1973. L'analyse quantitative en géographie. Presses Universitaires de France. París.
- Worldclim, <http://www.worldclim.org/>. Global Climate Data. Consultado 11/07/2013.

CAPÍTULO 3: Evaluación de capacidad de acogida para distintos usos

3.1. Introducción

El OT debe contemplar tres etapas: Diagnóstico, planificación y gestión territorial (Paruelo et al., 2014). En el Capítulo anterior se obtuvieron las UBAs a partir de la superposición de las zonificaciones biofísica, socio-económica y político-institucional. Estas unidades se caracterizaron en base a estos tres aspectos, obteniéndose de esta manera un diagnóstico integral del territorio.

Entre los aspectos técnicos a considerar en la etapa de planificación se incluye la definición de la capacidad de cada una de las unidades de planificación de acoger las distintas alternativas de uso (Gómez Orea, 2008). Si bien, en el NOA, ante la obligatoriedad de Ley de Bosques Nativos de Argentina (Ley 26.331: Merenson 2008) sancionada en 2007, se elaboraron planes de OT, no hubo coordinación y acuerdos entre las provincias acerca de los métodos y objetivos del OT (Somma, 2011).

La evaluación de la aptitud de la tierra es un paso importante en la planificación del uso de la tierra (Xu y Zhang, 2013). FAO (1976) ha recomendado un enfoque por el cual la evaluación de aptitud debe considerar propiedades del suelo, del clima, la vegetación y el relieve. Para contemplar todos estos aspectos las técnicas de evaluación multicriterio son especialmente apropiadas. En los últimos años, el interés de los investigadores en integrar EMC con SIG ha crecido enormemente (Malczewski, 2010; Stewart y Janssen, 2014; Jelokhani-Niaraki y Malczewski, 2015) dando lugar a diversos análisis de decisión multicriterio basados en SIG y herramientas que los implementan.

La EMC basada en SIG puede ser definida como un proceso que transforma y combina datos geográficos (mapas de criterios) y valores de juicio (preferencias e incertidumbres de tomadores de decisiones) para obtener información apropiada y útil para la toma de decisiones. Mientras el SIG es reconocido como una herramienta potente e integrada con capacidad de almacenar, manipular, analizar y visualizar datos espaciales para la toma de decisiones, la EMC provee una colección de procedimientos para estructurar problemas de decisión, diseñar, evaluar y priorizar decisiones alternativas (Boroushaki & Malczewski, 2010).

La capacidad de acogida de uso se define como el grado de idoneidad que presenta el territorio para una actividad teniendo en cuenta a la vez, la medida en que el medio cubre sus requisitos locacionales y los efectos de dicha actividad sobre el medio (Gómez Orea, 1992). En nuestro país, algunos ejemplos son la evaluación de la capacidad del territorio para acoger actividades recreativo-educativas en Tandil (Fernández et al., 2014) y la evaluación de la implementación de un área protegida en el Chaco Serrano de la Rioja (Recalde y Zapata, 2009).

En este capítulo se utilizará EMC basada en SIG para evaluar la capacidad de acogida de uso (CAU) para diferentes actividades, utilizando como insumos la información obtenida en el capítulo II: agricultura, aprovechamiento forestal del bosque nativo, ecoturismo, conservación y ganadería extensiva.

Los métodos de planificación participativos y colaborativos han demostrado ser los más efectivos (Jelokhani-Niaraki y Malczewski, 2015), dada la diversidad de actores en los problemas asociados, a la mayor complejidad de los problemas de decisión y a su tendencia a democratizar la planificación (Stewart et al., 2004). Para facilitar la participación se generaron scripts y plugins que permiten a los actores involucrados

correr los modelos de evaluación de capacidad de acogida variando los criterios y ponderaciones según sus valores de juicio y los métodos de EMC.

Área de estudio

El área evaluada corresponde al Departamento Anta en la Provincia de Salta, la cual está ubicada entre los 24°5'55" y 25°42'35" de latitud sur y entre los 62°56'36" y 64°57'33" de longitud oeste (Figura 3.1).

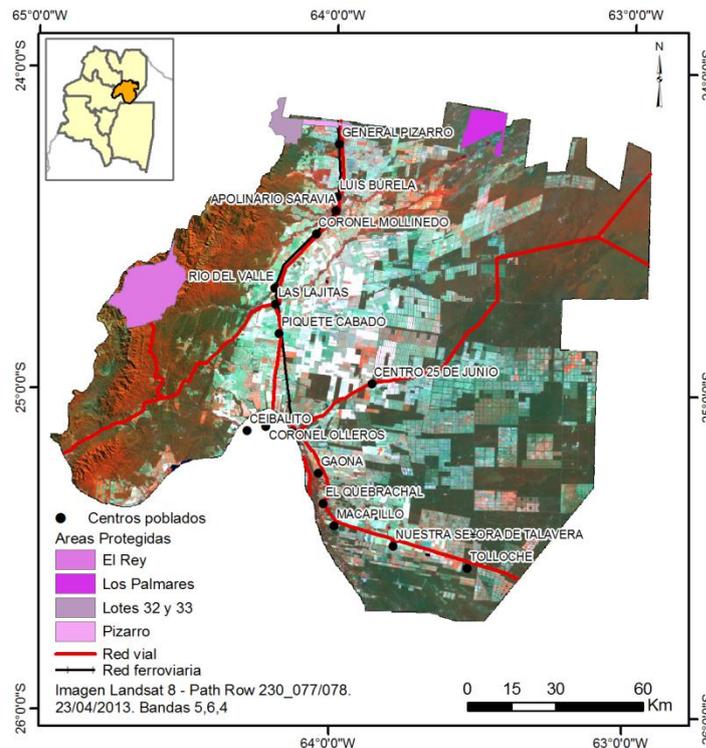


Figura 3.1. Ubicación del Departamento Anta, red vial y ferroviaria, localidades importantes y áreas protegidas superpuestas en una imagen satelital Landsat 8 OLI.

El departamento de Anta cubre un área de 22.900 Km², abarca el 14,8% del territorio provincial. El área posee un clima tropical serrano con temperaturas medias de 12° C en invierno y de 27° C en verano (Beaumont, 2014). Las precipitaciones son de tipo monzónico, es decir, ocurren principalmente en los meses de verano y primavera, y son casi nulas en invierno. Éstas también responden a un gradiente altitudinal, siendo mayores sobre los cerros (1500 mm a 2000 mm anuales) y al oeste donde son favorecidas por la elevación de los vientos húmedos y menores en la base hacia el este, 600 a 700 mm anuales (Beaumont, 2014).

Tomando la información de la base de datos generada en el Capítulo II, sobre condiciones biofísicas, socio-económicas y político-institucionales, se destacan a continuación algunos rasgos distintivos. Respecto a las condiciones biofísicas, Anta está dividido en dos zonas bioclimáticas (Figura 2.4): la zona 2 está asociada a los climas templados húmedos y la zona 5 de clima semiáridos, caracterizadas a partir de los promedios de las variables bioclimáticas consideradas (Tabla 2.7). Por superposición de las pendientes y de suelos, se diferencian 7 zonas biofísicas (Figura 2.7). Respecto a los suelos, un 8% de la superficie posee suelos categorizados como no aptos, el 10% suelos marginalmente aptos y el 82% suelos aptos. En cuanto a las pendientes, un 82% de la

superficie se clasificó como Tierras a nivel, un 7% como tierras de pendiente ligera, 7% como tierras con pendiente moderada y el 4% restante como tierras escarpadas. En relación a las condiciones socio-económicas, Anta tiene una población de aproximadamente 57.411 habitantes (4,73 % de la provincia de Salta), con una densidad poblacional de 2,6 hab/Km² en el 2010, habiendo aumentando un 15,2% con respecto al censo del 2001. La población urbana en Anta representa aproximadamente el 68% del departamento, mientras que la población rural representa el 32% (INDEC, 2011). El índice de dependencia potencial (personas potencialmente inactivas por cada 100 potencialmente activas) es del 67%. En cuanto a las condiciones educacionales, teniendo en cuenta el máximo nivel alcanzado, un 16% de la población tiene estudios primarios completos, el 9% nivel secundario, el 4% estudios terciarios/ universitarios y el 0,04% estudios postuniversitarios. La tasa de analfabetismo es del 6 %. Respecto al régimen de tenencia de la vivienda, el 71% son propietarios, el 8% inquilinos y el resto son ocupantes. En cuanto a la calidad de conexión a servicios el 32% tiene conexión a servicios satisfactoria (agua a red pública y desagüe cloacal), el 22% cuenta con calidad de servicios básica (agua de red pública y el desagüe a pozo con cámara séptica) y 46% tiene servicios insuficientes (no cumplen ninguna de las 2 condiciones anteriores). Los hogares con Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) representan más del 28%, afectando al 32% de la población. El Índice de suficiencia ferroviaria es bajo (Índice de Engel = 1,5) y la distribución espacial de la población es concentrada (Índice de Clark-Evans = 0,5).

Los tipos de uso del suelo primarios (Morales Ponclava et al., 2012) incluyen agricultura, ganadería extensiva e intensiva, producción de madera, áreas de reserva de biosfera, parques nacionales, provinciales y municipales, servicios hídricos (riego, energía, abastecimiento de agua potable). En relación a las condiciones político-institucionales, Anta se encuentra dividido en 5 Municipios: Apolinario Saravia, El Quebrachal, General Pizarro, Joaquín V. Gonzalez y Las Lajitas (INDEC, 2011). Posee 4 áreas protegidas: Reserva provincial “Lotes 32 y 33”, Reserva provincial “Los Palmares”, Reserva Nacional “Pizarro” y Parque Nacional “El Rey” (Sistema Federal de Áreas Protegidas, SIFAP)

La guía metodológica para la formulación de planes de ordenamiento territorial de Bolivia (Ministerio de Desarrollo sostenible y Planificación, 2010) sugiere trabajar con un enfoque multiescalar, en los diferentes niveles territoriales. En el capítulo anterior se hizo una evaluación integral de las potencialidades y limitantes a nivel regional (NOA), y en este capítulo, se evaluará la aptitud de una unidad territorial para el desarrollo de distintas actividades o usos de suelos, en este caso, el departamento Anta. Se seleccionó este departamento debido a la confluencia de diferentes ambientes, usos y problemáticas y a la disponibilidad de información.

3.2. Materiales y Métodos

Se consultó a un grupo multidisciplinario de expertos en diversas etapas del proceso (Tabla A.10, Apéndice A). Inicialmente se realizaron entrevistas a los especialistas con el fin de identificar los usos de suelos relevantes en el área y los criterios que se deberían considerar para evaluar la capacidad de acogida para los diferentes usos. Los usos priorizados fueron agricultura, aprovechamiento forestal del bosque nativo, ecoturismo, conservación y ganadería extensiva.

3.2.1. Introducción a la lógica difusa

La lógica difusa es una extensión de la lógica convencional que puede manejar el concepto de verdad parcial, es decir, valores entre “totalmente verdadero” y “totalmente falso”. Fue propuesta por Zadeh (1965), quien introdujo el concepto de conjunto difuso (“Fuzzy Set”). Ilustraremos este concepto con la variable índice de productividad (IP) de los suelos. Utilizando la lógica clásica, podíamos decir que los suelos son “suelos productivos” si su IP es mayor a 0,60. Así un suelo cuyo IP es 0,61 pertenece al conjunto, en cambio un suelo con IP de 0,59 ya no pertenecería al conjunto. El enfoque de la lógica difusa considera que el conjunto “suelos productivos” no tiene una frontera clara que defina la pertenencia a él, así mediante una función que define la transición de “productivo” a “no productivo” se asigna a cada valor de IP un grado de pertenencia al conjunto, entre 0 y 1. Así por ejemplo un suelo cuyo IP es de 0,59 podría pertenecer al conjunto “suelos productivos” con un 0,8 de pertenencia. Ver Figura 3.2.

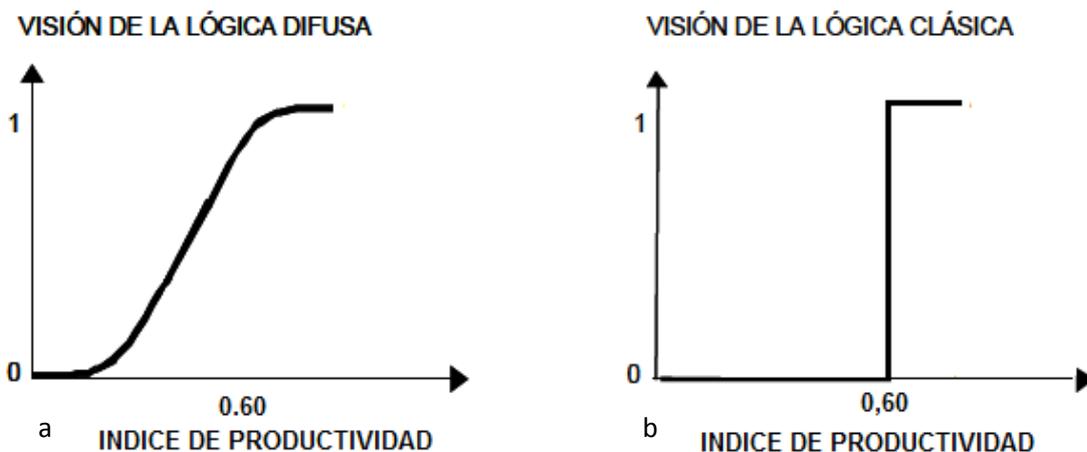


Figura 3.2. Función de pertenencia asociada a la variable Índice de Productividad de los suelos según la visión de la lógica difusa (a) y según la visión de la lógica clásica (b).

Wang et al. (1990) propuso el uso de conjuntos difusos en la evaluación de aptitud de tierras a través de los cuales los límites exactos entre las clases aptas y no aptas son reemplazados por el concepto de grado de pertenencia.

Un enfoque utilizado para resolver problemas de evaluación multicriterio es usar un sistema basado en reglas. En un sistema de inferencia basado en reglas difusas, cada criterio de un problema de EMC es expresado en la forma de una regla IF-THEN (si-entonces), la parte IF muestra las condiciones que deben ser satisfechas (antecedente) y la parte THEN muestra la conclusión (consecuente) si esas condiciones efectivamente se cumplen. Estas reglas representan formas de razonamiento en un lenguaje natural que combinan las variables de entrada para relacionarlas con la variable final. Los valores lingüísticos del consecuente deben ser expresados en forma numérica. Cuando un gran número de atributos están involucrados en la toma de decisiones, el diseño de la base de reglas se vuelve un proceso tedioso (Reshmidevi et al., 2009)

3.2.2. Escala

Para evaluar la capacidad de acogida para los usos priorizados se generó una grilla de 250 m, que corresponde a una escala 1:500.000.

3.2.3. Metodología

El procedimiento de EMC basada en SIG se llevó a cabo para cada uso de suelo priorizado. Para cada uno de ellos, se consideraron a las celdas de la grilla como el conjunto de alternativas, un conjunto de criterios de evaluación en base a los cuales las alternativas son evaluadas, y un grupo de tomadores de decisiones (los actores sociales en sus diferentes roles). Las p alternativas se denotan por A_k para $k=1,2,\dots,p$. Las alternativas son evaluadas con respecto a un conjunto de n criterios, C_i , para $i=1,2,\dots,n$. Cada alternativa es descrita por un conjunto de valores de criterios estandarizados, $A_k = [a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}]$ y $a_{ki} \in [0,1]$ para $i=1,2,\dots,n$. El grupo de tomadores de decisiones es denotado por D_l , donde l representa un individuo involucrado en el proceso de toma de decisiones, $l=1,2,\dots,q$, y que es el responsable de establecer un conjunto de pesos w_i para $i=1,2,\dots,n$ para luego aplicar una regla de decisión (método de EMC) y generar el mapa de CAU (Figura 3.3.)

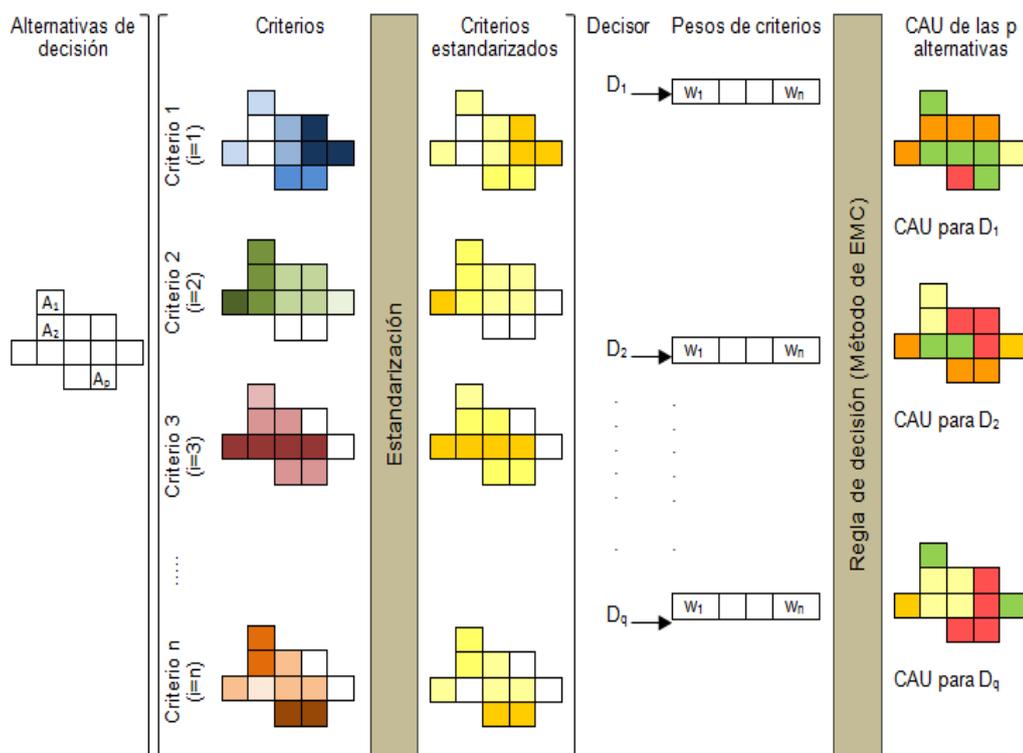


Figura 3.3. Estructura esquemática de un proceso de Evaluación multicriterio (EMC) basado en Sistema de Información Geográfica (SIG) para un uso de suelo. CAU significa capacidad de acogida de uso. Los colores graduados (oscuros a claros) muestran la valoración de las alternativas, según el criterio para ese uso, desde la mejor (más oscuro) a la peor (más claro)

Para cada uso de la tierra se seguirá la siguiente metodología esbozada en la Figura 3.4 (Adaptado de Bunruamkaew y Murayama, 2011)

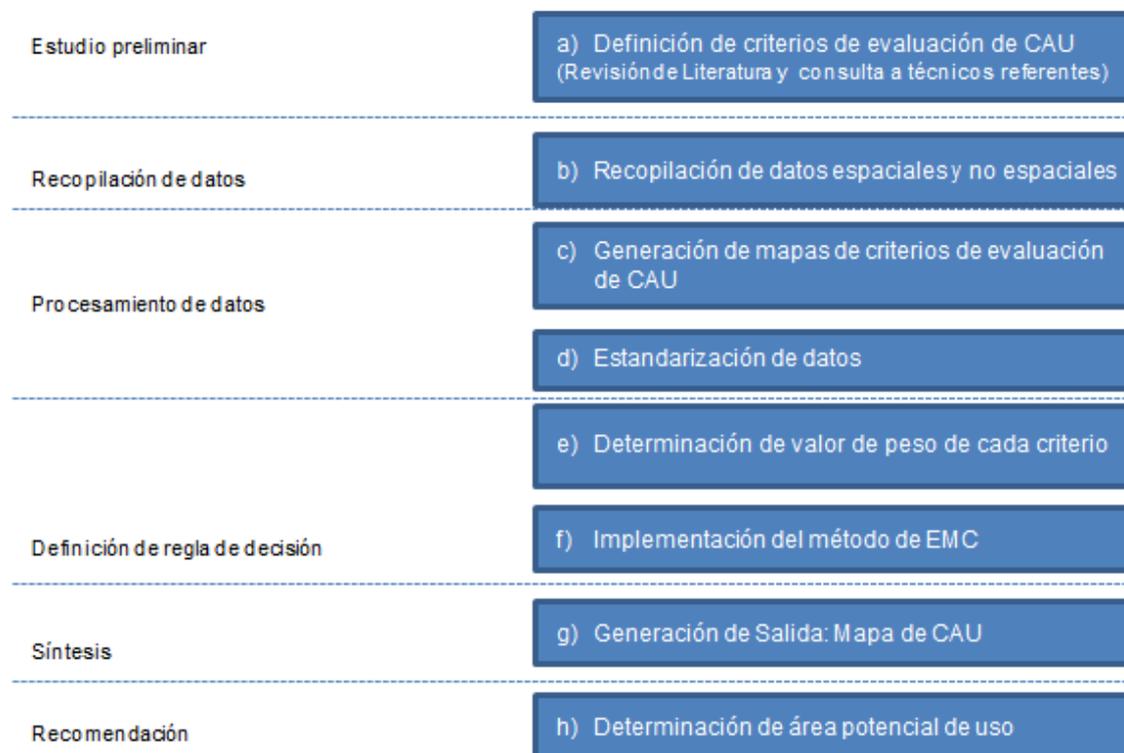


Figura 3.4. Diagrama esquemático para modelar evaluación capacidad de acogida para diferentes usos (CAU), adaptado de Bunruamkaew y Murayama, 2011

a) Definición de criterios de evaluación de CAU.

El proceso de identificación y definición de los criterios para evaluar la capacidad de acogida para los usos del suelo seleccionados y la cuantificación de variables categóricas se sustentó en el análisis y discusión de la literatura disponible y en los aportes de especialistas (Tabla A.10, apéndice A). Los mismos fueron agrupados en factores y restricciones, considerándose factores a los criterios cuantificados que no restringen la ubicación de las actividades en el territorio y restricciones a los criterios que sí las restringen.

En este trabajo no se consideró la zonificación de las áreas boscosas de la Provincia de Salta (Ley 26.331) como restricción a los diferentes usos de suelos, ya que el objetivo de la tesis es proponer herramientas alternativas, al equipo técnico involucrado en los procesos de ordenamiento territorial, que les permita sugerir usos potenciales. Las tablas 3.1, 3.3, 3.5, 3.7 y 3.9 muestran los factores y restricciones considerados para evaluar la capacidad de acogida para los usos priorizados.

USO AGRICOLA

Tabla 3.1. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para uso agrícola.

Objetivo	Factores	Restricciones
Agricultura	F1- Índice de productividad (IP)	R1- Áreas naturales protegidas
	F2- Cobertura del suelo	R2- Márgenes de cursos de agua
	F3- Pendiente	R3- Ejidos urbanos
	F4- Disponibilidad de riego	R4- Cuerpos de agua
	F5- Accesibilidad a centros poblados	R5- Pendientes mayores a 15%

FACTORES

F1- Índice de Productividad: calculado según la ecuación $IP = H * D * Pef * Ta * Tb * Sa * Na * MO * Pd$ (Nakama y Sobral, 1985; Morales Monclava et al., 2012) donde H=condición climática (A. Bianchi, INTA EEA Salta, comunicación personal), D=drenaje, Pef=profundidad efectiva, Ta=textura del horizonte superficial, Tb=textura subsuperficial, Sa=salinidad, Na=alcalinidad, MO=materia orgánica, Pd=pendiente.

En CITAB (2004) las zonas más aptas (aquellas con valores de IP entre 70 y 100), se consideran viables para ser incorporadas a la actividad agrícola, valores entre 30 y 69 se consideran de aptitud agrícola-ganadera, zonas con IP menores a 49 se consideran aptas para la ganadería en la rotación, y aquellas con IP menor a 29, zonas con orientación estrictamente ganadera.

F2- Cobertura del suelo: Cobertura del suelo observada (Morales Ponclava et al., 2012). Se asignaron valores en el rango 0-1 a las diferentes categorías presentes en el área de acuerdo a su facilidad y/o factibilidad de conversión a uso agrícola (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.

Cobertura del suelo	Valor
Cultivos de graminoideas/ no graminoideas	1
Cultivos de especies arbóreas	0,60
Pastizal cerrado	0,80
Arbustal cerrado	0,60
Bosque abierto	0,40
Bosque cerrado	0,30
Herbáceas cerradas en áreas saturadas o con freática alta	0,80
Arbustal cerrado a abierto en áreas regularmente inundadas	0,60
Bosques cerrados en áreas regularmente inundadas	0,30
Cuerpos de agua	0

F3- Pendiente: pendiente del suelo obtenida a partir del DEM de 90 m (CGIAR-CSI), considerando de mayor aptitud para la agricultura a las tierras planas (pendientes menores a 1,5%).

F4- Disponibilidad de riego: A las áreas con riego se le asignó el valor 1 asumiendo que no presentan limitaciones en cuanto a disponibilidad de agua para el cultivo y a las áreas sin riego se le asignó el valor 0.

F5- Accesibilidad a centros poblados: se consideró el tiempo de traslado a los principales centros poblados, teniendo en cuenta la distancia a los mismos y la dificultad presentada por los diferentes tipos de caminos (pavimentados, consolidados o de tierra) o inexistencia de camino; con el fin de cuantificar la facilidad de transporte de cargas, provisión de insumos y traslado de trabajadores. Para evaluar la CAU agrícola, se podría reemplazar este factor por la accesibilidad a centros de acopio y distribución o darle mayor valor a las áreas más accesibles a centros poblados que dispongan de esta infraestructura logística.

RESTRICCIONES

R1- Áreas naturales protegidas: Los parques nacionales, provinciales y municipales, áreas de reserva de biosfera y monumentos naturales existentes, por poseer pautas preestablecidas para su conservación y limitaciones importantes respecto al uso productivo de sus recursos, son consideradas restricciones.

R2- Márgenes de los ríos: Se considera como restricción un buffer de 300 m a ambos lados de los cursos de agua. Ante el desconocimiento de la existencia de una Ley de protección de las áreas ribereñas en la Provincia de Salta, se tomó como referencia la distancia establecida por la ley provincial N° 6.841 de Conservación y uso múltiple de las áreas forestales de la Provincia de Santiago del Estero.

R3- Ejidos urbanos: Por ser zonas desarrolladas urbanísticamente no admiten cambios de uso de suelo.

R4- Cuerpos de agua: El área ocupada por cuerpos de agua se excluye del análisis.

R5- Pendientes mayores a 15%: se consideran áreas con impedimentos físicos importantes para realizar la actividad, que en el caso de habilitarse pueden generar problemas de degradación importantes.

APROVECHAMIENTO FORESTAL DEL BOSQUE NATIVO

Tabla 3.3. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para el aprovechamiento forestal del bosque nativo.

Objetivo	Factores	Restricciones
Aprovechamiento forestal del bosque nativo	F1- Cobertura del suelo	R1- Áreas naturales protegidas
	F2- Productividad primaria neta	R2- Márgenes de cursos de agua
	F3- Altitud	R3- Ejidos urbanos
	F4- Pendiente	R4- Áreas no forestales
	F5- Accesibilidad a centros poblados	

FACTORES

F1- Cobertura del suelo: cubierta biofísica observada en la superficie de la tierra (Morales Ponclava et al., 2012). Se asignaron valores en el rango 0-1 a las diferentes categorías presentes en el área de acuerdo a su potencial para el aprovechamiento forestal (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.

Cobertura del suelo	Valor
Bosque abierto	0,75
Bosque cerrado	1
Bosques cerrados en áreas regularmente inundadas	1
Otras coberturas	0

F2- Productividad primaria neta: El Índice de vegetación normalizado (NDVI) permite estimaciones confiables de la productividad primaria de los ecosistemas terrestres (Running et al. 2000, Paruelo y Vallejos, 2013). Se estimó la productividad primaria neta anual como el promedio interanual de la integral del NDVI calculado a partir de los productos MOD13Q1 de MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de los años 2000 a 2014. La integral anual se calculó como la suma de los NDVI desde Julio de un año hasta Junio del año siguiente.

F3- Altitud: Se consideran más favorables para el aprovechamiento forestal del bosque nativo aquellas zonas con cotas altitudinales menores 700 msnm, disminuyendo su aptitud a medida que incrementan las alturas. Los datos de cotas se extrajeron del DEM de 90m (CGIAR-CSI)

F4- Pendiente: Pendiente del suelo obtenida a partir del DEM de 90m (CGIAR-CSI), considerando de mayor aptitud por la facilidad de extracción y transporte, las zonas de pendientes menores a 7%.

F5- Accesibilidad a centros poblados: Ídem a F5 de uso agrícola.

RESTRICCIONES

R1- Áreas naturales protegidas: ídem a R1 de uso agrícola.

R2- Márgenes de cursos de agua: ídem a R2 de uso agrícola.

R3- Ejidos urbanos: ídem a R3 de uso agrícola.

R4- Áreas no forestales: Las categorías de arbustales, pastizales, cultivos y cuerpos de agua se excluyen del análisis.

ECOTURISMO

Tabla 3.5. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para el Ecoturismo

Objetivo	Factores	Restricciones
Ecoturismo	F1- Heterogeneidad del paisaje	R1- Ejidos urbanos
	F2- Cobertura del suelo	
	F3- Distancia a áreas especiales	
	F4- Altitud	
	F5- Pendiente	
	F6- Proximidad a lugares históricos y sitios culturales	
	F7- Efecto de red vial	
	F8- Distancia desde centros poblados	

FACTORES

F1- Heterogeneidad del paisaje: Se consideró que cuanto más heterogéneo es el paisaje es mayor su atracción paisajística. Para estimar la heterogeneidad se clasificó una imagen Landsat 8 OLI (USGS, Servicio Geológico de EE.UU) del 23 de abril de 2013 en 60 clases a través de un método de clasificación no supervisada y luego se obtuvo la cantidad de clases diferentes en cada celda de la grilla. Se obtuvieron un máximo de 28 clases en las celdas (mayor heterogeneidad). Se puede utilizar para cuantificar este factor el concepto de cuencas visuales (no abordado en este trabajo)

F2- Cobertura del suelo: A partir de la consulta a un especialista (Tabla A10, anexo A) se asignaron valores discretos en el rango 0-1 a las diferentes categorías presentes en el área de acuerdo a su aptitud como sitio destinado a la realización de actividades de ecoturismo y atracción visual (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.

Cobertura del suelo	Valor
Cuerpos de agua, hielo o nieve	1
Tierras cultivadas y/o manejadas	0
Pastizal cerrado	1
Herbáceas cerradas en áreas saturadas o con freática alta	1
Arbustal cerrado	0,25
Arbustal cerrado a abierto en áreas regularmente inundadas	0,25
Bosque abierto	0,85
Bosque cerrado	1
Bosques cerrados en áreas regularmente inundadas	1

F3- Distancia a áreas especiales: La presencia de especies y ecosistemas singulares o emblemáticos aumenta la aptitud del área desde el punto de vista paisajístico. Se obtuvo la cartografía de Parques nacionales, provinciales y municipales, monumentos naturales, áreas de reserva de biosfera del SIFAP y se consideró un buffer de 2 Km a su alrededor por su grado de conservación. A estas áreas se le sumó un buffer de 300 m a ambos márgenes de los ríos por la presencia de vegetación de ribera y posteriormente se calculó la distancia a estos sitios.

F4- Altitud: Se consideran más apropiadas para turismo las cotas entre 600 y 1800 msnm. Estos valores fueron propuestos por un especialista teniendo en cuenta la accesibilidad, la belleza paisajística y la posibilidad de realizar actividades recreativas. Los datos de cotas se extrajeron del DEM de 90m (CGIAR-CSI)

F5- Pendiente: Pendiente del suelo obtenida a partir del DEM de 90m (CGIAR-CSI), considerando de mayor aptitud para actividades recreativas las pendientes entre 10 y 35%. Se podría reemplazar o complementar este factor con un índice de rugosidad del paisaje, que se asocia con la heterogeneidad del relieve y tiene una relación potencial positiva con el atractivo turístico.

F6- Proximidad a lugares históricos y sitios culturales: Se calcularon las distancias lineales a sitios históricos y culturales. La ubicación de los sitios fue descargada desde la página oficial del Ministerio de cultura y turismo de la Provincia de Salta.

F7- Efecto de red vial: La presencia de caminos se asocia con la pérdida de biodiversidad. Por lo cual se consideró que la aptitud aumenta a medida que incrementa la distancia a la red vial. Se consideró que la aptitud aumenta a partir de 2 Km desde las rutas y 1 Km desde los caminos. Por otra parte, si nos alejamos a más de 50 Km, la aptitud disminuye ya que afecta la accesibilidad y la disponibilidad de servicios.

F8- Distancia a centros poblados: La ocupación humana, por lo general, produce modificación de los ecosistemas y deterioro de la biodiversidad, por lo tanto, su influencia disminuye el valor de conservación de los recursos naturales. Se consideró que la aptitud aumenta a partir de 15 Km de las localidades grandes (más de 15.000 habitantes), 10 Km de las localidades medianas (entre 1.000 y 15.000 habitantes) y 3 Km de las localidades pequeñas (menos de 1.000 habitantes). Por otra parte, si nos alejamos a más de 50 Km, la aptitud disminuye ya que afecta la accesibilidad y la disponibilidad de servicios.

RESTRICCIONES

R1- Ejidos urbanos: Ídem a R3 de uso agrícola.

CONSERVACIÓN

Tabla 3.7. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para Conservación

Objetivo	Factores	Restricciones
Conservación	F1- Heterogeneidad del paisaje	R1- Áreas naturales protegidas (buffer de 2 Km)
	F2- Cobertura del suelo	R2- Ejidos urbanos
	F3- Tamaño de parches	
	F4- Distancia al vecino más próximo	
	F5- Distancia a cuerpos y cursos de agua	
	F6- Efecto de canales	
	F7- Efecto de red vial	
	F8- Distancia desde centros poblados	
	F9- Alteración peridoméstica	
	F10- Densidad de límites catastrales	
	F11- Pendiente	

FACTORES

F1- Heterogeneidad del paisaje: A mayor heterogeneidad del paisaje, más complejo es el ambiente y mayor la probabilidad de que la biodiversidad sea alta, lo que sugiere un mayor valor para la conservación. Se utilizó el factor F1 de ecoturismo.

F2- Cobertura del suelo: Se asignó mayor valor a las coberturas según su potencial para albergar diversidad de especies. Los valores de las categorías de cobertura se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.

Cobertura del suelo	Valor
Cuerpos de agua, hielo o nieve	1
Tierras cultivadas y/o manejadas	0
Pastizal cerrado	1
Herbáceas cerradas en áreas saturadas o con freática alta	1
Arbustal cerrado	0,25
Arbustal cerrado a abierto en áreas regularmente inundadas	0,25
Bosque abierto	0,70
Bosque cerrado	0,8
Bosques cerrados en áreas regularmente inundadas	0,8

F3- Tamaño de parches: Se tomaron las categorías de vegetación natural y seminatural y se calculó el área de los parches, considerando que a mayor superficie, es mayor la probabilidad de albergar mayor cantidad y variabilidad de especies.

F4- Distancia al vecino más próximo: Se calculó la distancia al fragmento más próximo de la misma clase como una medida para estimar la posibilidad de las especies de moverse entre los parches.

F5- Distancia a cuerpos y cursos de agua: A menor distancia a cuerpos y cursos de agua permanentes o áreas regularmente inundadas, mayor valor para la conservación, ya que son sitios de concentración de fauna, especialmente durante las sequías. Se consideró una influencia de 3 Km a su alrededor.

F6- Efecto de canales: Los sistemas de canalizaciones afectan negativamente la biodiversidad local (alteraciones en la disponibilidad local de agua, introducción de especies exóticas, alteración del gradiente topográfico y sus comunidades asociadas) aumentando así el valor para la conservación de un área determinada en función de la distancia.

F7- Efecto de red vial: Ídem a F7 de Ecoturismo.

F8- Distancia a centros poblados: Ídem a F8 de Ecoturismo.

F9- Alteración peridoméstica: El ambiente peridoméstico, área que rodea a los puestos, establecimientos y parajes, es una zona degradada o con muy escasa vegetación por el uso continuo que le dan los pobladores a los bienes y servicios provistos por la naturaleza. Su zona de influencia se estimó hasta los 1.000 metros a la redonda y se la consideró de bajo valor para la conservación.

F10- Densidad de límites catastrales: A menor densidad de límites catastrales, mayor aptitud para la conservación. Se consideró que una mayor densidad de límites de propiedades afecta la aptitud para la conservación por la complejidad que significa establecer áreas protegidas o cualquier otra práctica de manejo en áreas con mayor número de propietarios. Se calculó la frecuencia de líneas de catastro (m/ha) en un radio de 1.000 m.

F11- Pendiente: Pendiente del suelo obtenida a partir del DEM de 90m (CGIAR-CSI), considerando de mayor aptitud las pendientes mayores a 30%, por ser zonas de cabeceras de corrientes fluviales, regiones de vegetación mejor conservadas, debido a su menor accesibilidad.

RESTRICCIONES

R1- Áreas naturales protegidas: Ídem a R1 de uso Agrícola, considerando un buffer de 2 Km a su alrededor por considerarse áreas que tienen menor grado de intervención antrópica por la legislación vigente.

R2- Ejidos urbanos: Ídem a R3 de Agricultura.

GANADERIA

Tabla 3.9. Criterios para evaluar la capacidad de acogida para Ganadería extensiva

Objetivo	Factores	Restricciones
Ganadería extensiva	F1- Cobertura del suelo	R1- Áreas naturales protegidas
	F2- Áreas de sobreuso	R2- Márgenes de cursos de agua
	F3- Distancia a cuerpos de agua y cursos de agua	R3- Ejidos urbanos
	F4- Precipitación media anual	R4- Cuerpos de agua
	F5- Temperatura media anual	
	F6- Tamaño de parcelas	
	F7- Pendiente	
	F8- Accesibilidad a centros poblados	

FACTORES

F1- Cobertura del suelo: Se asignaron valores en el rango 0-1 a las diferentes categorías presentes en el área de acuerdo a su facilidad y/o factibilidad de conversión a uso ganadero (Tabla 3.10).

Tabla 3.10. Cuantificación de categorías de cobertura de suelos.

Cobertura del suelo	Valor
Pastizal cerrado	1
Herbáceas cerradas en áreas saturadas o con freática alta	0,75
Arbustal cerrado	0,50
Arbustal cerrado a abierto en áreas regularmente inundadas	0,40
Cultivos de graminoideas/ no graminoideas	1
Cultivos de especies arbóreas	0,50
Bosque cerrado	0,20
Bosque abierto	0,40
Cuerpos de agua, nieve o hielo	0

F2- Áreas de sobreuso: Se asignó el valor 1 a las zonas de uso agrícola en suelos con limitaciones importantes para agricultura ($IP < 30\%$).

F3- Distancia a cuerpos y cursos de agua: La disponibilidad de agua para consumo animal aumenta la aptitud de un área para la ganadería. Se consideró un área de influencia de 3 Km a su alrededor.

F4- Precipitación promedio anual: Se consideró la precipitación como condicionante para la producción de pasturas, considerando un requerimiento mínimo de 350 mm anuales.

F5- Temperatura media anual: Se consideró la temperatura como condicionante para la producción de pasturas, considerando de mayor aptitud el rango de 12 a 36°.

F6- Tamaño de parcelas: Se definió un tamaño mínimo de la unidad productiva de 200 ha para un sistema de producción ganadero extensivo, incrementándose su aptitud con el aumento de superficie.

F7- Pendiente: Para no condicionar la movilidad del ganado se consideran de mayor aptitud las zonas de menor pendiente, considerándose no aptas las pendientes superiores al 40%.

F8- Accesibilidad a centros poblados: Ídem a F5 de Agricultura.

RESTRICCIONES

R1- Áreas naturales protegidas: Ídem a R1 de Agricultura.

R2- Márgenes de cursos de agua: Ídem a R2 de Agricultura.

R3- Ejidos urbanos: Ídem a R3 de Agricultura.

R4- Cuerpos de agua: Ídem a R4 de Agricultura.

b) Recopilación de datos espaciales y no espaciales.

Los datos utilizados para la evaluación de capacidad de acogida provienen de una variedad de fuentes (Tabla 3.11). Los datos primarios y temáticos derivados se sistematizaron en una base de datos geográfica de postgis con sus metadatos correspondientes.

Tabla 3.11. Datos primarios: escala de los datos vectoriales, resolución de los datos raster y fuente.

Datos	Escala/Resolución	Fuente
Límites administrativos	Vector 1:250.000	SIG-250. IGN, 2012
Red vial	Vector 1:250.000	SIG-250. IGN, 2012
Centros poblados	Vector 1:250.000	SIG-250. IGN, 2012
Cursos de agua	Vector 1:250.000	SIG-250. IGN, 2012
Cuerpos de agua	Vector 1:250.000	SIG-250. IGN, 2012
Ejidos urbanos	Vector 1:250.000	SIG 250. IGN, 2012
Cobertura y uso de suelos	Vector 1:250.000	Morales Ponclava et al., 2012. INTA
DEM	Raster 90 m	CGIAR-CSI
Áreas protegidas	Vector 1:250.000	SIFAP
Lugares de atracción Turística	Datos de GPS	Ministerio de Cultura y Turismo de la Provincia de Salta
Índice de Productividad de suelos	Raster 100 m	Morales Ponclava et al., 2015. INTA
Disponibilidad de riego	Vector 1:250.000	INTA Salta
Datos de población 2010	Vector 1:250.000	INDEC, 2011
Catastro de Salta	Desconocida	Dirección General de Inmuebles de Salta
Precipitación media anual	Raster 700 m	Bianchi y Cravero, 2010. INTA
Temperatura media anual	Raster 700 m	Bianchi y Cravero, 2010. INTA
Imagen Landsat 8 OLI – 23/04/2013	Raster 30 m	USGS, Servicio Geológico de EE.UU.

Productividad Primaria Neta	Raster 250 m	INTA Santiago del Estero
-----------------------------	--------------	--------------------------

c) Generación de mapas de criterios de evaluación de CAU.

Para obtener los factores y las restricciones se llevaron a cabo una serie de procesos sobre los datos primarios utilizando el plugin “Processing” de QGIS (QGIS) y plugins desarrollados ad hoc para automatizar procedimientos de uso frecuente con el fin de generar los mapas de criterios a partir de los datos básicos y hacer las transformaciones necesarias para llevarlos a la resolución y extensión del análisis.

Estandarización de datos

Para integrar distintos criterios, independientemente del método de evaluación a utilizar, es deseable que dicha evaluación se realice sobre escalas comparables en tipo, rango de extensión, unidad de medida (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005). En este caso, los valores absolutos de las distintas variables son muy diferentes, por lo que es necesaria una normalización para evitar soluciones sesgadas hacia las variables con mayores rangos de variabilidad (Romero, 1993). Eastman (2006) señala que se debe aplicar la transformación de tal modo que todos los factores estén positivamente correlacionados con la aptitud.

Se re-escalaron las variables de modo que tomen valores entre 0 (peor localización) y 1 (mejor localización). Existen numerosos métodos de normalización, en este trabajo se utilizaron:

Estandarización simple: se da un valor a cada clase basado en el conocimiento de los especialistas. Permite transformar una escala nominal a un valor. Se utilizó para normalizar las clases de cobertura de suelos según su aptitud para el uso evaluado (Tablas 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10) y para cuantificar la variable disponibilidad de agua de riego y áreas de sobreuso.

Estandarización basada en funciones de pertenencia difusas: Estas funciones son utilizadas para representar una forma de incertidumbre (Eastman, 2006), derivada de información borrosa, imprecisa o sin límites definidos (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005). Los factores que tienen valores continuos son representados como conjuntos difusos (Zadeh, 1965) a través de funciones de pertenencia difusas. En este trabajo se utilizaron las funciones de “fusificación” del módulo del software SAGA, que incluye funciones lineales (Figura 3.5), Sigmoides (Figura 3.6) y en forma de J (Figura 3.7) definidas a partir de puntos de control A, B, C y D. El proceso de reescalamiento se definió por un conjunto de puntos de inflexión sobre la curvas (Tabla 3.12). Por ejemplo se definió que zonas con pendientes menores a 1,5% tienen mayor aptitud para el uso agrícola, disminuyendo su aptitud hasta el 10%, considerándose no aptas las pendientes superiores. En este caso se asoció a este factor una función sigmoide decreciente (Figura 3.6), en la cual toman valor 1 las pendientes menores a 1,5%; valores de pendientes entre 1,5% y 10% decrecen gradualmente de 1 a 0, y toman valor 0 las pendientes superiores.

Weyland (2005) afirma que la forma elegida así como el umbral para los valores de pertenencia dependerán de los conocimientos sobre el sistema y sostiene que se puede recurrir a información existente, al conocimiento empírico o a la evaluación subjetiva de expertos. En este trabajo tanto la forma como los umbrales se obtuvieron a través de la consulta al panel de expertos (Tabla A.10, apéndice A).

Tabla 3.12. Puntos de inflexión de las funciones de pertenencia difusas

Punto	Tratamiento
A	Valores menores que A toman el valor 0
B	Valores entre A y B incrementan desde 0 a 1
C	Valores entre B y C toman el valor 1 Valores entre C y D decrecen desde 1 a 0
D	Valores mayores que D toman el valor 0

Se utilizaron funciones de pertenencia difusas, los valores umbrales A, B, C, D se obtuvieron de revisión bibliográfica y opiniones de expertos. Las Tablas 3.13 a 3.17 muestran las funciones y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para cada uso evaluado.

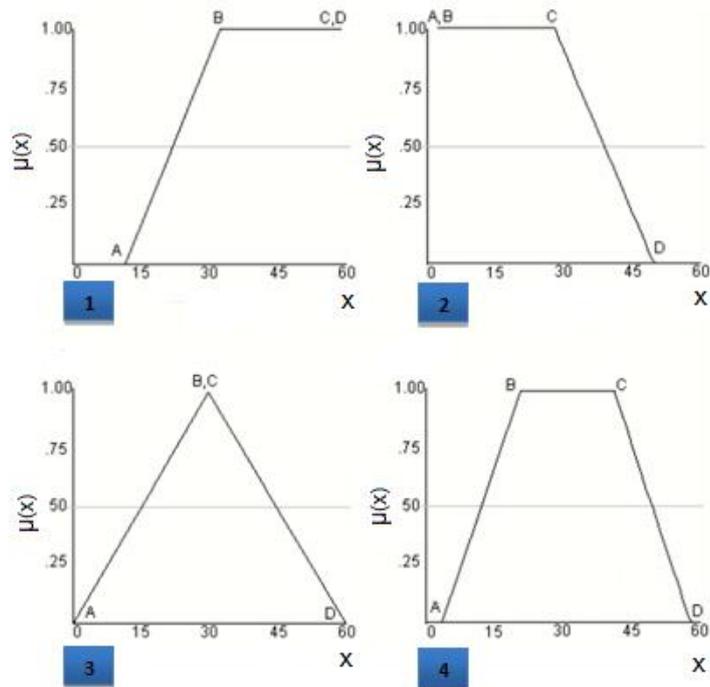


Figura 3.5. Funciones de pertenencia difusa lineales

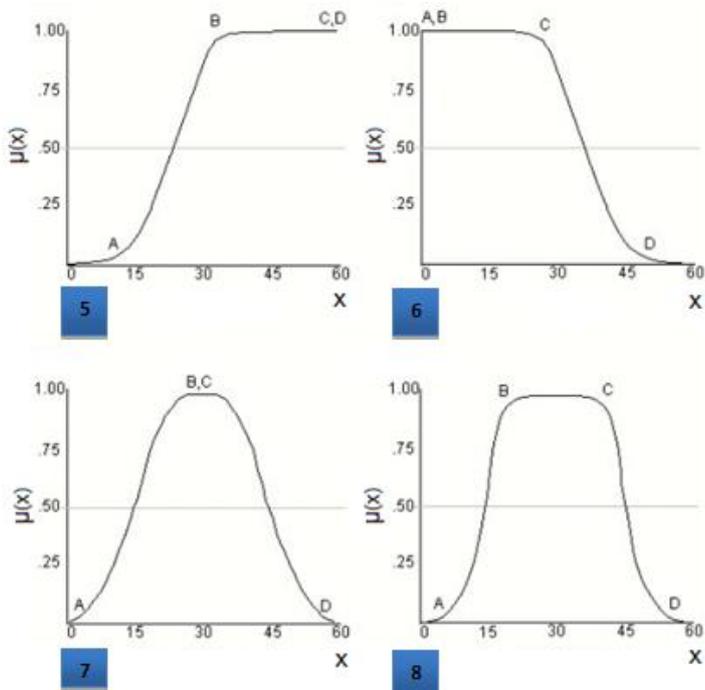


Figura 3.6. Funciones de pertenencia difusa Sigmoides

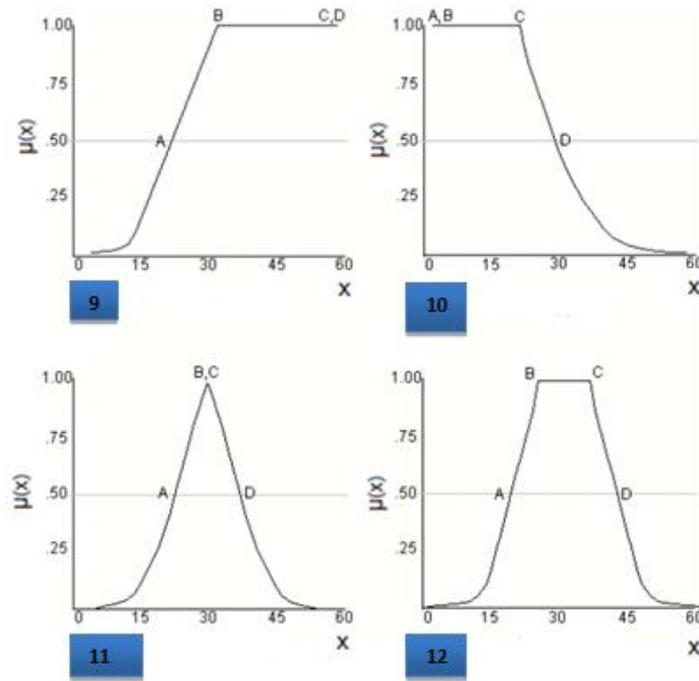


Figura 3.7. Funciones de pertenencia difusa en forma de J

En el caso de tratarse de variables compuestas se aplicaron las funciones AND (“y lógico”), OR (“ó lógico”) y NOT para obtener el mínimo o máximo de los valores de los factores simples reescalados (Figura 3.8).

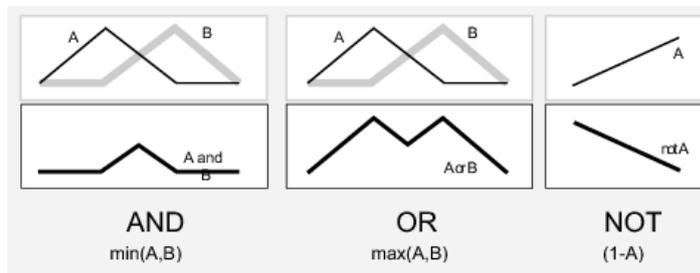


Figura 3.8. Funciones de pertenencia difusa para reescalar factores compuestos

Tabla 3.13. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para agricultura. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7

Factores	Función	A	B	C	D
F1	1	30	100	120	120
F3	6	0	0	1,5	10
F5	2	0	0	0	40.000

Tabla 3.14. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para **aprovechamiento forestal del bosque nativo**. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7

Factores	Función	A	B	C	D
F2	1	13,5	18	24	24

Factores	Función	A	B	C	D
F3	6	0	0	700	1.500
F4	6	0	0	7	15
F5	1	0	0	0	40.000

Tabla 3.15. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para **ecoturismo**. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7

Factores	Función	A	B	C	D
F1	1	0	38	60	60
F3	2	0	0	0	10.000
F4	7	400	600	1.800	2.000
F5	6	0	0	10	35
F6	6	0	0	15.000	45.000
F7	AND de F7-1 y F7-2				
F7-1. Distancia desde caminos	5	1.000	6.000	60.000	60.000
F7-2. Distancia desde rutas	5	2.000	20.000	60.000	60.000
F8	AND de F8-1, F8-2 y F8-3				
F8-1. Distancia desde localidades grandes (más de 15.000 habitantes)	5	15.000	50.000	150.000	150.000
F8-2. Distancia desde localidades medianas (1.000 a 15.000 habitantes)	5	10.000	30.000	150.000	150.000
F8-3. Distancia desde ciudades pequeñas (menos de 1.000 habitantes)	5	3.000	20.000	150.000	150.000

Tabla 3.16. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para **conservación**. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7

Factores	Función	A	B	C	D
F1	1	0	38	60	60
F3	5	10	1.000	100.000	100.000
F4	2	0	0	0	5.000
F5	OR de F5-1 y F5-2				
F5-1. Distancia a cuerpos de agua y áreas regularmente anegadas	6	0	0	300	3.000
F5-2. Distancia a cursos de agua	6	0	0	300	3.000
F6	5	3.000	15.000	100.000	100.000
F7	Ídem a F7 de Tabla 3.15				

Factores	Función	A	B	C	D
F8	Ídem a F8 de Tabla 3.15				
F9	1	500	1.000	60.000	60.000
F10	2	0	0	0	1,1
F11	5	30	40	100	100

Tabla 3.17. Funciones difusas y parámetros utilizados para normalizar los factores considerados para evaluar capacidad de acogida para **ganadería extensiva**. Los números de la columna Función se refieren al identificador asignado a las funciones en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7

Factores	Función	A	B	C	D
F3	OR de F3-1 y F3-2				
F3-1. Distancia a cuerpos de agua	6	0	0	300	3.000
F3-2. Distancia a cursos de agua	6	0	0	300	3.000
F4	5	350	700	1.500	1.500
F5	5	12	24	26	36
F6	5	200	2.000	90.000	90.000
F7	6	0	0	10	40
F8	Ídem a F8 de Tabla 3.15				

d) Determinación de valor de peso de cada criterio

Los pesos de los criterios fueron calculados a través del proceso de jerarquías analíticas (Analytical Hierarchy Process, AHP) (Saaty, 2008), uno de los métodos más populares para calcular pesos de criterios en EMC mediante una matriz de comparación por pares de expertos (Marinoni, 2004; Hossain y Dass, 2010).

Este procedimiento parte de establecer una matriz cuadrada A en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar (n), cada elemento de la matriz s_{ij} representa la importancia del factor i (C_i) respecto del factor j (C_j) para i y j que varía que varía entre 1 y n. La escala de medida establecida para la asignación de los juicios de valor (s_{ij}) es una escala de tipo continuo (cocientes o razones) que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9 (Saaty 1977, 1980) tal y como se representa en la Figura 3.9. Así a la diagonal principal de la matriz se le asigna el valor 1, que denota igualdad en la comparación de un factor consigo mismo, se destaca además que la matriz es recíproca ($s_{ij} = 1/s_{ji}$), los valores asignados a ambos lados de la diagonal son inversos (si el factor C es 3 veces más importante que el factor B, entonces, B será 1/3 veces menos importante que C).

1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extremadamente	Fuertemente	Moderadamente	Ligeramente	Igual	Ligeramente	Moderadamente	Fuertemente	Extremadamente								
MENOS IMPORTANTE								MÁS IMPORTANTE								

Figura 3.9. Escala de comparación por pares de AHP (Saaty y Vargas, 1991)

Luego de construir la matriz S, el procedimiento establece el cálculo del vector propio principal derecho normalizado de la matriz, el cual representa el orden de prioridad de los factores, mientras que el valor propio máximo (λ_{MAX}) de la matriz es una medida de consistencia de los juicios. Para ello se normaliza la matriz S, obteniendo la matriz B, con elementos b_{ij} definidos a partir de la ecuación 3.1.

$$b_{ij} = \frac{s_{ij}}{\sum_{i=1}^n s_{ij}} = 1,2,3, \dots, n \quad (3.1)$$

Los valores normalizados se suman por filas obteniéndose de esta forma el vector propio principal, el cual se normaliza, dividiendo cada uno de los valores de dicho vector entre n (número de factores), obteniendo de esta manera el vector propio principal derecho normalizado que representa los pesos (w_i) de cada factor (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005)

Así, cada valor de peso w_i es calculado a partir de la ecuación 3.2.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad i, j = 1,2,3, \dots, n \quad (3.2)$$

En aplicaciones AHP es importante que los pesos derivados de la matriz de comparación por pares sean consistentes, el método provee un indicador denominado razón de consistencia (consistency ratio, CR) como un indicador del grado de consistencia o inconsistencia (Feizizadeh et al., 2014), dicho valor se establece a partir del cociente entre el valor del índice de consistencia (consistency index, CI) y el índice aleatorio (random index, RI), ecuación 3.3.

$$CR = CI/RI \quad (3.3)$$

El CI es un valor obtenido a partir del valor propio máximo (λ_{MAX}), según la ecuación 3.4.

$$CI = (\lambda_{MAX} - n)/(n-1) \quad (3.4)$$

λ_{MAX} es el valor propio principal que se obtiene a partir del producto del vector propio principal normalizado y el vector resultante de la sumatoria de los valores de las columnas de la matriz de comparación por pares.

RI representa el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación 100.000 matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9 a 9) con juicios de valor recíprocos y diagonal igual a 1. Se estableció una tabla de valor RI para matrices de orden 1 hasta 15 (Tabla 3.18)

Tabla 3.18. Valores de índices de consistencia aleatorio (RI) para diferentes órdenes de matrices

Orden (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Valor	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Si $CR < 0,10$ la matriz de comparación por pares tiene una consistencia aceptable, los valores de pesos son válidos y pueden ser utilizados (Saaty, 1977). De otro modo si el $CR \geq 0,10$ las comparaciones por pares carecen de consistencia y la matriz necesita ser ajustada y los valores de los elementos deben ser modificados (Feizadeh y Blaschke, 2013)

Para obtener los pesos de los factores para los usos, se trabajó individualmente con 4 profesionales especializados en temáticas relacionadas al uso considerado (Tabla A.10, apéndice A). Se utilizó una planilla de cálculos para automatizar el proceso de obtención de las ponderaciones a partir de la matriz de comparación por pares (Figura A.1). Las Tablas 3.19 a 3.23 muestran las matrices de comparación por pares, los pesos y CR obtenidos para cada uso de suelo.

Tabla 3.19. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Agrícola

Factores	F1	F2	F3	F4	F5	Pesos
F1	1	6	2	6	8	0,46
F2		1	1/6	1	1/2	0,06
F3			1	6	8	0,35
F4				1	1	0,06
F5					1	0,07

Razón de consistencia: 0,037

Tabla 3.20. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Aprovechamiento forestal del bosque nativo

Factores	F1	F2	F3	F4	F5	Pesos
F1	1	1	7	1/2	4	0,24
F2		1	7	1/2	5	0,25
F3			1	1/8	1/4	0,03
F4				1	5	0,39
F5					1	0,08

Razón de consistencia: 0,037

Tabla 3.21. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Ecoturismo

Factores	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	Pesos
F1	1	1	1/2	8	8	1	2	2	0,16
F2		1	1/3	8	8	1	2	2	0,16
F3			1	8	8	1	3	3	0,26
F4				1	4	1/6	1/5	1/5	0,03
F5					1	1/6	1/6	1/6	0,02
F6						1	3	3	0,19
F7							1	1	0,09
F8								1	0,09

Razón de consistencia: 0,045

Tabla 3.22. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Conservación

Factores	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	Pesos
F1	1	1	3	7	4	8	4	3	3	4	8	0,21
F2		1	3	7	4	8	4	3	3	4	8	0,21
F3			1	7	7	9	4	3	3	3	8	0,17
F4				1	1/6	4	1/7	1/6	1/6	1/4	1/2	0,02
F5					1	8	1/2	1/2	1/2	2	2	0,06
F6						1	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	0,01
F7							1	1	1	2	3	0,08
F8								1	1	3	3	0,08
F9									1	3	4	0,08
F10										1	4	0,05
F11											1	0,03

Razón de consistencia: 0,073

Tabla 3.23. Matriz de comparación por pares y pesos de los factores de evaluación de CAU Ganadero

Factores	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	Pesos
F1	1	1	1/2	1/2	1/2	2	1	3	0,10
F2		1	1	1/5	1/5	1	1/2	2	0,07
F3			1	1/4	1/4	2	2	2	0,11
F4				1	1	5	3	5	0,27
F5					1	5	3	5	0,27
F6						1	2	2	0,07
F7							1	2	0,08
F8								1	0,04

Razón de consistencia: 0,04

e) Implementación del método de EMC

Se utilizó el método de sumatoria lineal ponderada, por sus siglas en inglés WLC (Weighted Linear Combination) a través del cual los valores de los criterios estandarizados fueron ponderados por los pesos derivados de la matriz de comparación por pares y agregados linealmente para obtener la evaluación de capacidad de acogida para cada uso considerado. La ecuación usada para ello, está dada por:

$$R = \sum_{i=1}^n w_i \times a_i \prod_{j=1}^m r_j \quad (3.5)$$

Donde R es el resultado de evaluación de CAU considerado, w_i es el peso del criterio i obtenido de AHP, donde $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, a_i es el valor estandarizado del criterio i, n es el número de factores, r_j son las restricciones definidas para cada uso y m es el número de restricciones.

f) Determinación de área potencial de uso

Se usó un Plugin EasyAHP versión 0.8 disponible en el repositorio de complementos de QGIS (QGIS), al que se le hicieron las modificaciones para que considere las restricciones, permitiendo enmascarar las alternativas que no están

permitidas para ese uso por limitaciones legales o biofísicas, obteniéndose de este modo el mapa final de aptitud según la ecuación 3.5.

g) Generación de Salida: Mapas de CAU

Los mapas resultantes fueron reescalados a 4 niveles de aptitud, adaptado del sistema FAO (1976) para facilitar la comparación e interpretación visual de los resultados. Las clases son: altamente aptas (S1), moderadamente aptas (S2), marginalmente aptas (S3) y no aptas (N) según lo especificado en la Tabla 3.24. Se calcularon las superficies en ha para cada nivel de aptitud de los usos considerados.

Tabla 3.24. Correspondencia entre niveles de aptitud y capacidad de acogida derivado de la aplicación de la ecuación 3.5.

Niveles de aptitud	Capacidad de acogida
S1	0,80 - 1
S2	0,60 – 0,79
S3	0,40 – 0,59
N	0 – 0,39

Para obtener el mapa de áreas para usos múltiples (posibles áreas en conflicto), se reclasificaron los niveles de aptitud S1 y S2 como “Aptas” y S3 y N como “No aptas” para cada uso de suelo y se superpusieron los mapas de niveles de aptitud recategorizados para obtener un mapa de aptitud para usos múltiples. Este mapa delimita zonas e identifica para cada una de ellas, los usos para los cuales fue clasificada como apta (S1, S2). A partir del mapa se calcularon las superficies de cada una de las zonas de aptitud para usos múltiples.

3.3. Sistema de inferencia basados en reglas difusas para la evaluación de capacidad de acogida de uso

El sistema de inferencia basado en reglas difusas consta de 4 pasos: a) fusificación de los atributos, b) generación de las reglas difusas, c) agregación de las reglas y d) defusificación para encontrar valores de aptitud precisos (Reshmidevi et al., 2009).

a) Fusificación de los atributos: Es el proceso por el cual, los valores de atributos precisos, generalmente medidos en diferentes escalas son convertidos en un rango común [0,1] a través de funciones de pertenencia difusas. Este proceso fue explicado en el apartado Estandarización de datos, contemplando variables nominales y variables continuas. Para ejemplificar su uso se consideraron 3 criterios de la Tabla 3.1: F1- Índice de productividad, F3- Pendiente y F5- Accesibilidad a centros poblados, los cuales ya fueron estandarizados a través de las funciones de pertenencia difusas especificadas en la Tabla 3.13.

b) Generación de la base de reglas difusas: Es esperable que en problemas de toma de decisiones espaciales, los decisores puedan ser reticentes a proveer juicios numéricos precisos con respecto a los criterios de decisión (Borouhaki y Malczeuski, 2010). Las variables lingüísticas facilitan las transiciones graduales, además nos permiten tratar con la ambigüedad propia de los problemas espaciales.

Se generó la base de reglas difusas considerando que los criterios de entrada se pueden clasificar en tres clases de aptitud: baja, media y alta, entendiéndose que los

términos “baja”, “media” y “alta” están relacionados a una medida de aptitud para el uso considerado y no al valor de la variable. La variable de salida (capacidad de acogida para un uso) se define en términos de cuatro clases de aptitud: altamente aptas (S1), moderadamente aptas (S2), marginalmente aptas (S3) y no aptas (N). Así, un ejemplo de regla IF – THEN utilizando términos lingüísticos es:

“IF índice de productividad es BAJA AND la Pendiente es BAJA AND la accesibilidad a centros poblados es BAJA THEN la capacidad de acogida para uso agrícola es NO APTA”

Para facilitar la construcción de las reglas con todas las posibles combinaciones de los valores lingüísticos de las variables de entrada se construyó una matriz de reglas que fue completada por uno de los expertos consultado en las etapas anteriores, Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Matriz de reglas difusas para evaluar la capacidad de acogida agrícola.

Regla	Índice de Productividad y	Pendiente y	Accesibilidad a centros poblados	Capacidad de acogida agrícola
R1	baja	baja	baja	N
R2	baja	baja	media	N
R3	baja	baja	alta	S3
R4	baja	media	baja	N
R5	baja	media	media	S3
R6	baja	media	alta	S2
R7	baja	alta	baja	S3
R8	baja	alta	media	S2
R9	baja	alta	alta	S2
R10	media	baja	baja	S2
R11	media	Baja	media	S2
R12	media	baja	alta	S1
R13	media	media	baja	S2
R14	media	media	media	S2
R15	media	media	alta	S1
R16	media	alta	baja	S2
R17	media	alta	media	S1
R18	media	alta	alta	S1
R19	alta	baja	baja	S2
R20	alta	Baja	media	S2
R21	alta	baja	alta	S2
R22	alta	media	baja	S2
R23	alta	media	media	S1
R24	alta	media	alta	S1
R25	alta	alta	baja	S2
R26	alta	alta	media	S1
R27	alta	alta	alta	S1

c) *Agregación de las reglas:* Los criterios son agregados para obtener la capacidad de acogida de uso. El proceso de arribar a una conclusión total a partir de la

base de reglas es conocido como agregación de las reglas. Dependiendo del número de atributos de entrada, el antecedente de una regla puede tener diferentes partes. El proceso de inferencia consiste en evaluar el grado de cumplimiento de todos los atributos en el antecedente, obtener el resultado de cada regla e integrar los resultados de las reglas para obtener un valor de aptitud total (Yager y Filev, 1994).

Chen y Huang (1992) propusieron un sistema para convertir términos lingüísticos en números difusos a través de funciones de pertenencia lineales, basándose en un número de escalas de conversión. El sistema de una escala, considera dos términos lingüísticos (medio, alto), el sistema de dos escalas, considera 3 términos lingüísticos (bajo, medio, alto) y el sistema de 3 escalas considera 5 términos lingüísticos (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto). La Tabla 3.28 muestra los valores de los puntos de inflexión de las funciones de pertenencia difusas (A, B, C, D) explicados en la Tabla 3.12. Las funciones de pertenencia difusas, asociadas a las escalas de conversión se ilustran en la Figura 3.16.

Tabla 3.28. Parámetros para convertir términos lingüísticos a números difusos, Chen y Huang (1992). Los valores A, B, C y D son los puntos de inflexión de las funciones de pertenencia difusas asociadas a los términos lingüísticos.

Termino Lingüístico	Una escala	Dos escalas	Tres escalas
	Número de términos lingüísticos		
	Dos A, B, C, D	Tres A, B, C, D	Cinco A, B, C, D
Muy bajo			(0.0, 0.0, 0.1, 0.2)
Bajo		(0.0, 0.0, 0.2, 0.4)	(0.1, 0.25, 0.25, 0.4)
Medio	(0.4, 0.6, 0.6, 0.8)	(0.2, 0.5, 0.5, 0.8)	(0.3, 0.5, 0.5, 0.7)
Alto	(0.6, 0.8, 0.8, 1.0)	(0.6, 0.8, 1.0, 1.0)	(0.6, 0.75, 0.75, 0.9)
Muy alto			(0.8, 0.9, 1.0, 1.0)

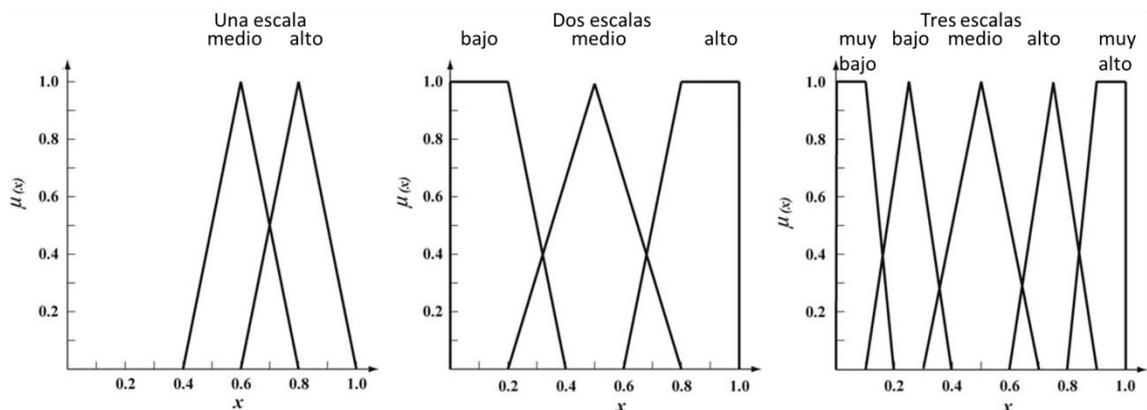


Figura 3.16. Escalas de conversión lingüística difusa

En una primera etapa se evaluó el cumplimiento de cada una de las partes que conforman el antecedente de la regla utilizando las funciones de pertenencia lineales de dos escalas de la Figura 3.16.

Para la regla tomada como ejemplo, si los valores estandarizados de los criterios de una unidad espacial tienen los valores $IP = 0$; Pendiente = 0; Accesibilidad a centros poblados = 0,24 al evaluar cada parte de la regla se obtiene:

$$\mu_{bajo}(IP = 0) = 1,$$

$$\mu_{\text{bajo}}(\text{pendiente} = 0) = 1 \text{ y}$$

$$\mu_{\text{bajo}}(\text{accesibilidad a centros poblados} = 0,24) = 0,79$$

En la segunda etapa se utiliza el método de agregación máximo-mínimo, el cual también es conocido como método de implicación de Mamdani (Ross, 1997). Se toman los valores de cumplimiento de cada parte del antecedente y se obtiene el mínimo de todos ellos, de este modo se obtiene un valor que se asocia al consecuente. Las reglas propuestas en la matriz de reglas se consideran disyuntivas unas de otras, por lo tanto las salidas de las reglas que tienen como consecuente igual clase de aptitud, son agregadas usando un operador de unión difuso, donde los valores máximos son seleccionados de un conjunto de resultados individuales, como se muestra en la ecuación 3.6:

$$\mu_{\text{clase aptitud}}(S) = \max_k [\min(\mu_m^k(\text{atributo}_i), \mu_n^k(\text{atributo}_j), \dots)] \quad k = 1, 2, \dots, r \quad (3.6)$$

Donde $\mu_m^k(\text{atributo}_i)$ es la pertenencia μ del atributo i para la condición en el antecedente de la regla k , $\mu_{\text{clase aptitud}}(S)$ representa el grado de cumplimiento por el cual el área satisface los criterios de aptitud de cada una de las clases de aptitud difusas m y n son los conjuntos difusos de cada uno de los criterios, r es el número de reglas que tienen como consecuente igual clase de aptitud.

Para el caso de la regla que se puso como ejemplo (R1), se obtiene el mínimo de los valores de cumplimiento de las condiciones del antecedente, en este caso $\min(1, 1, 0.79) = 0.79$

De igual manera se evaluarán cada una de las reglas individualmente. Para obtener $\mu_{\text{no apta}}(S)$ se obtendrá el valor máximo de todas las reglas cuyo consecuente sea CAU = No_apt. Considerando las reglas propuestas en la matriz de reglas se evalúan las reglas R2 y R4, obteniéndose en cada caso el $\min(1,1,0.14) = 0.14$ y $\min(1,0,0.79) = 0$. Así el valor de $\mu_{\text{no apta}}(S) = \max(0.79, 0.14, 0) = 0.79$

De manera análoga se evaluó la pertenencia a cada categoría de aptitud, obteniéndose $\mu_{\text{marginamente apta}}(S) = \mu_{\text{moderadamente apta}}(S) = \mu_{\text{altamente apta}}(S) = 0$

d) Defusificación: es el proceso de convertir los resultados difusos en un valor único por ejemplo el valor más representativo. Algunos de los métodos de defusificación más comúnmente usados son la máxima pertenencia, promedio ponderado, la pertenencia máxima media (Ross, 1997). En este trabajo se asociará a cada clase de aptitud el valor medio del rango establecido en la tabla 3.24 para cada una de ellas (Tabla 3.29) y se calculará el promedio ponderado de los valores obtenidos en el proceso de agregación para cada una de las clases y sus respectivos valores asignados (Ecuación 3.7)

Tabla 3.29. Valores precisos asignados a los niveles de aptitud

Niveles de aptitud	Capacidad de acogida (v_i)
S1	0,90
S2	0,70
S3	0,50
N	0,20

$$CAU_{uso} = \sum v_i \times \mu_{clase\ aptitud}(S_i) \quad (3.7)$$

Donde CAU_{uso} es la capacidad de acogida para el uso considerado, v_i es el valor asignado a cada clase de aptitud (Tabla 3.29), $\mu_{clase\ aptitud}(S_i)$ es el valor resultante del proceso de agregación de reglas para cada clase de aptitud considerada.

La capacidad de acogida para uso agrícola de la unidad espacial ejemplificada, es de 0.16.

3.4. Resultados

Los resultados debieran considerarse como preliminares, ya que es necesario que este proceso se dé en un espacio participativo, en el cual confluyan múltiples actores y un cuerpo técnico multidisciplinario. Se ha usado información oficial de libre acceso, para mostrar la factibilidad de aplicar la metodología en otras áreas de estudio. Las Figuras 3.10 a 3.14 muestran los mapas de niveles de aptitud resultantes de la aplicación del método WLC y la Tabla 3.25 detalla las superficies en ha de cada nivel de aptitud para los diferentes usos.

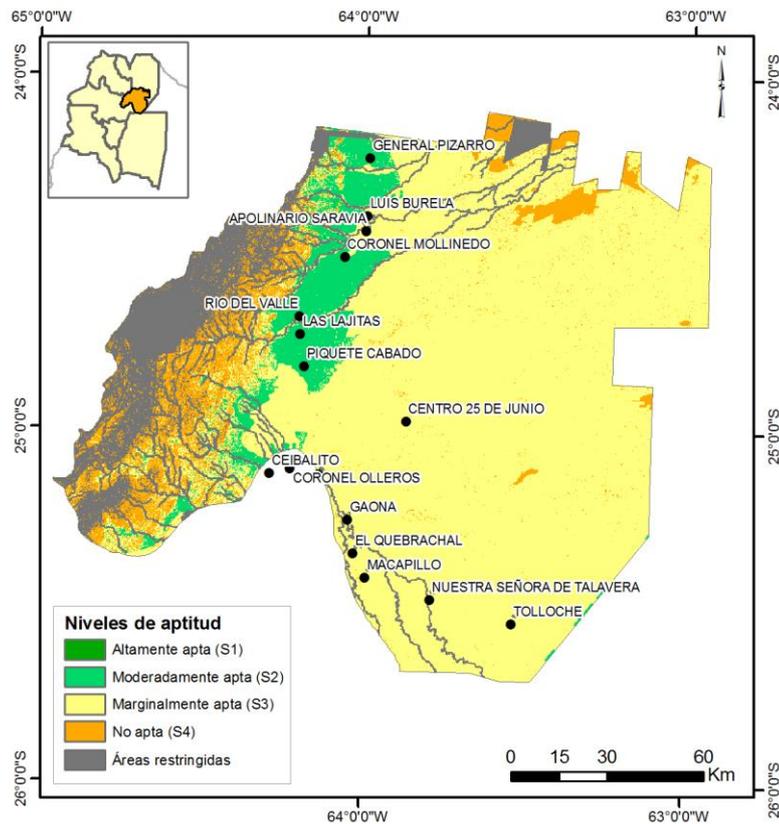


Figura 3.10. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para uso agrícola.

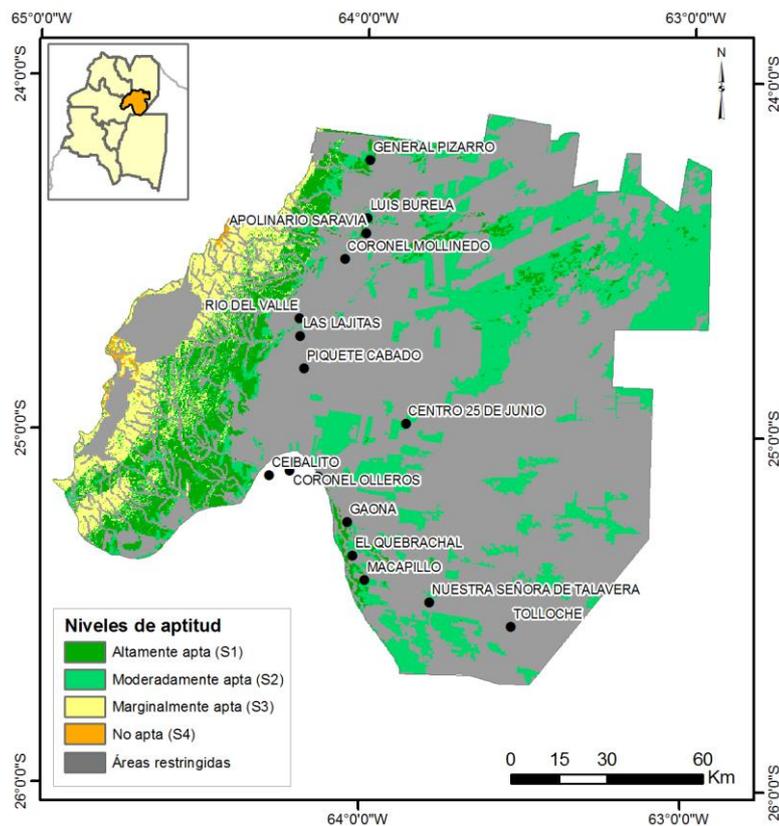


Figura 3.11. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para aprovechamiento forestal del bosque nativo.

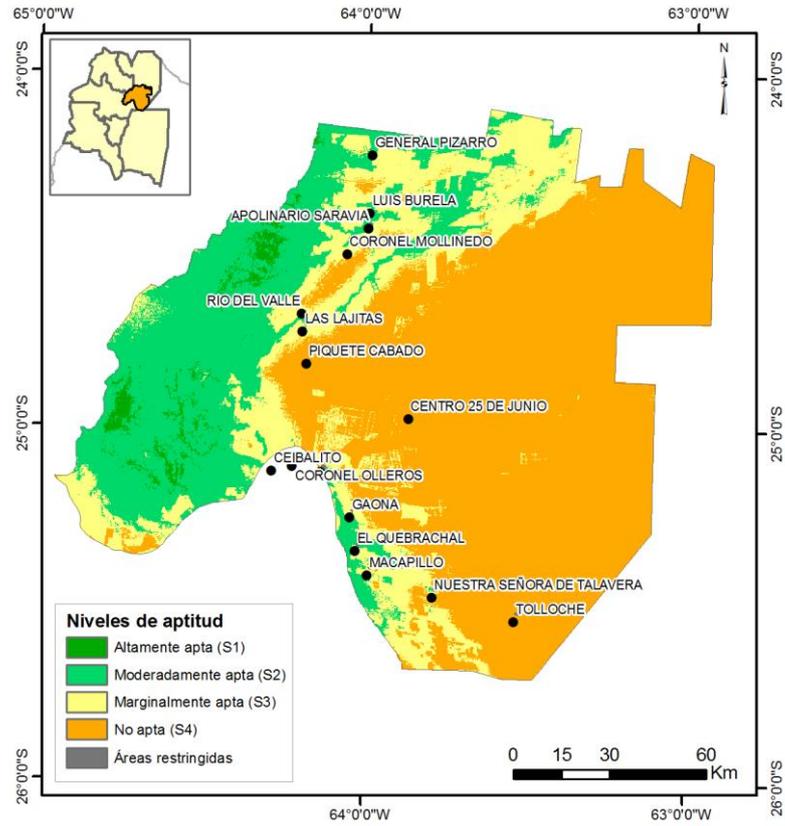


Figura 3.12. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para ecoturismo.

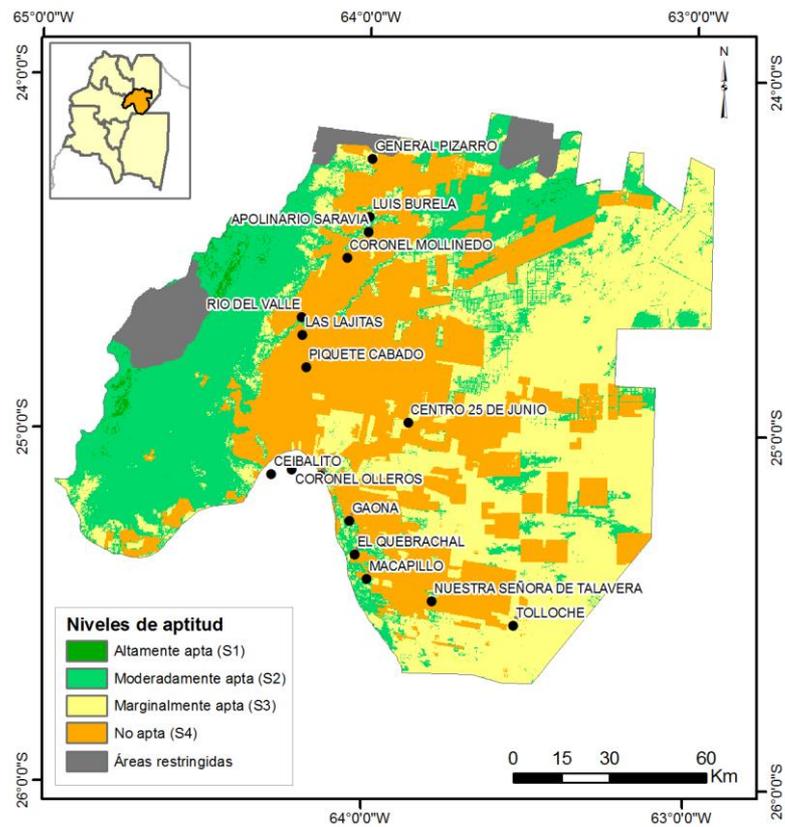


Figura 3.13. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para conservación.

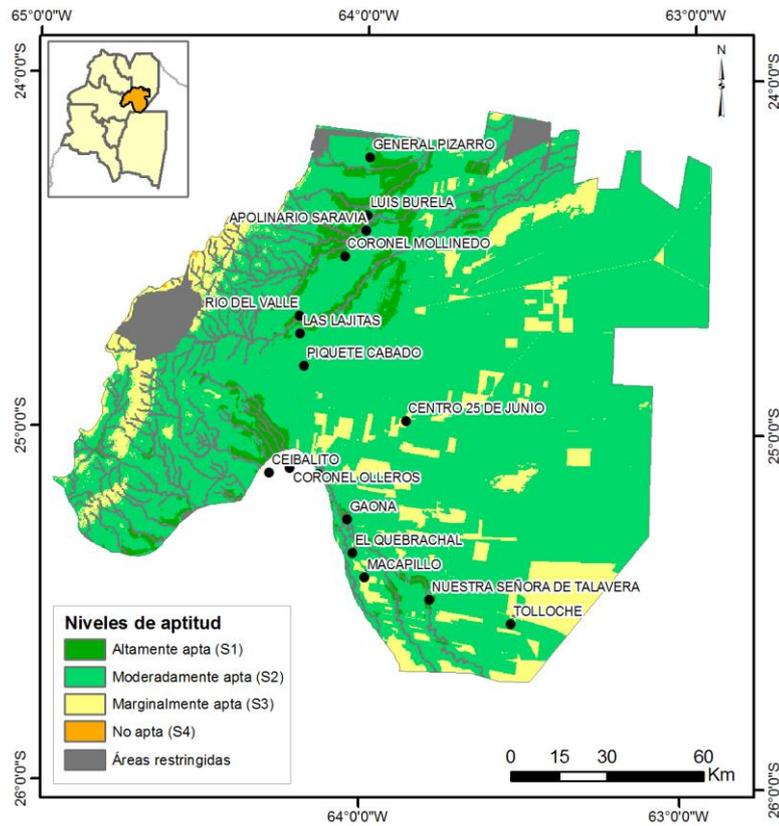


Figura 3.14. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para ganadería.

Tabla 3.25. Superficies en ha para cada nivel de aptitud de los usos considerados.

Nivel de aptitud	Color	Agricultura	Ap. Forestal del bosque nativo	Ecoturismo	Conservación	Ganadería
S1		94	180.606	33.950	12.213	97.631
S2		157.794	476.025	512.519	589.281	1.666.150
S3		1.563.569	116.656	428.206	796.606	260.588
N		193.094	5.331	1.253.456	730.869	444

Los mapas de niveles de aptitud para los cinco usos evaluados se resumieron en el mapa de usos múltiples (Figura 3.15), que muestra para cada zona los usos para los cuales fue clasificada como apta (S1, S2). A partir del mapa se calcularon las superficies de cada una de las zonas de aptitud para usos múltiples (Tabla 3.26).

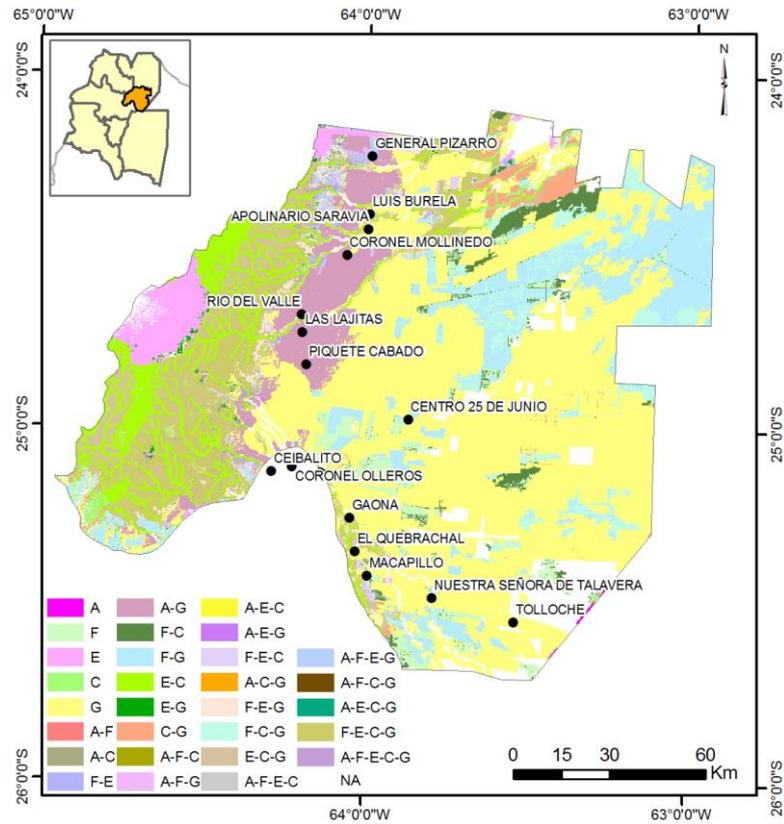


Figura 3.15. Aptitud para usos múltiples. La aptitud para los usos fue referenciada como “A”- agricultura, “F” – aprovechamiento forestal del bosque nativo, “E”– ecoturismo, “C”- conservación y “G”- ganadería. “NA”- no apto

Tabla 3.26. Superficies en ha y % para usos múltiples: “A”- agricultura, “F” – aprovechamiento forestal del bosque nativo, “E”– ecoturismo, “C”- conservación y “G”- ganadería. “NA”- no apto.

Aptitud usos	Superficie (ha)	Porcentaje
G	984.631	44.2
F-G	198.081	8.9
F-E-C-G	184.156	8.3
E-C	143.694	6.4
NA	130.419	5.9
A-G	127.425	5.7
F-C-G	95.050	4.3
E-C-G	75.544	3.4
E	64.031	2.9
F	63.325	2.8
F-C	39.244	1.8
F-E-G	35.788	1.6
C-G	28.694	1.3
A-F-E-C-G	13.731	0.6
A-F-E-G	11.894	0.5
C	11.719	0.5

F-E-C	9.488	0.4
E-G	5.131	0.2
A-F-G	3.106	0.1
F-E	2.469	0.1
A	900	0.0
A-E-G	569	0.0
A-F-C-G	131	0.0
A-F	50	0.0
A-F-C	50	0.0
A-F-E-C	13	0.0
A-C	6	0.0
	2,229,338	100.0

El resultado final obtenido a partir de la aplicación del Sistemas de inferencia basados en reglas difusas, para el área de estudio, en base a la matriz de reglas especificada en la Tabla 3.27, se muestra en la Figura 3.17.

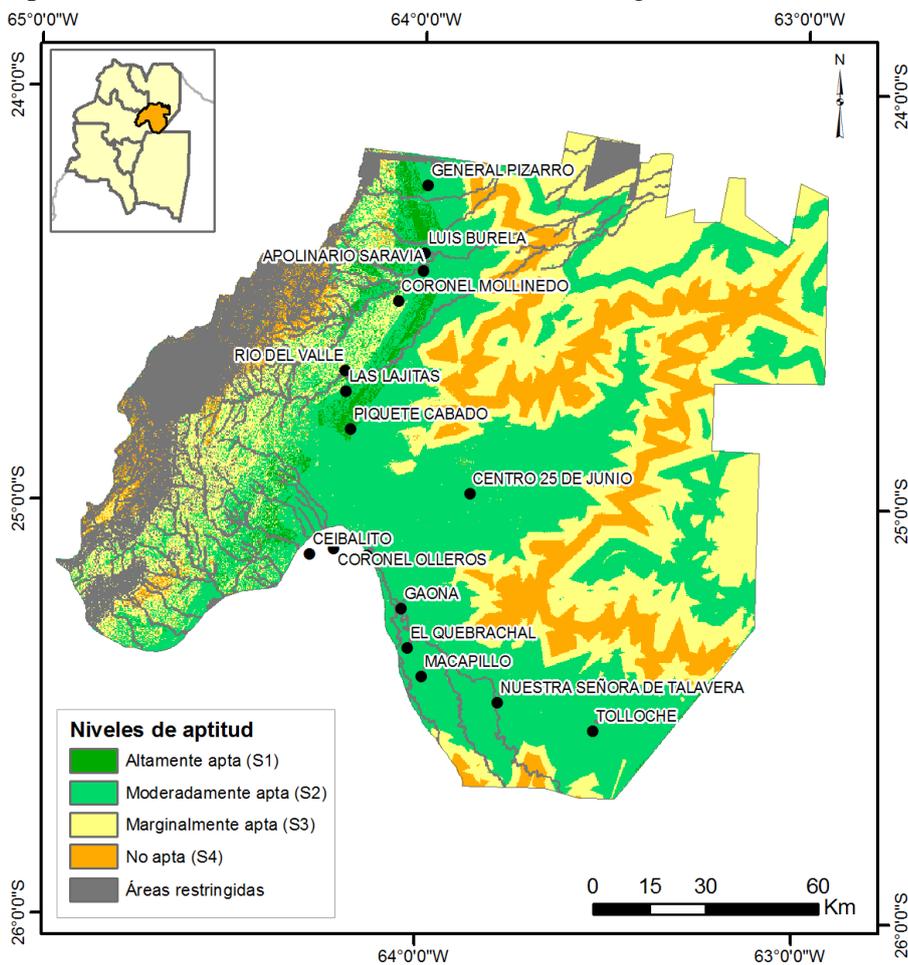


Figura 3.17. Niveles de aptitud de capacidad de acogida para uso agrícola determinados a partir de la aplicación de la lógica difusa.

3.5. *Discusión y conclusiones*

3.5.1. *A cerca de los resultados*

El OT procura adecuar los usos de suelo y la ocupación del espacio a las aptitudes y restricciones sociales de cada lugar, teniendo en cuenta las políticas, objetivos y estrategias del orden nacional, regional, provincial y local (Mendez Casariego y Pascale Medina, 2014). En la etapa de planificación, se requiere una fluida interacción y diálogo entre los componentes político y técnico siendo imprescindible la participación de múltiples instituciones y actores. El componente político determina los objetivos y dirige los conflictos en base a los intereses y valores en pugna, mientras que el componente técnico se ocupa de la caracterización del territorio en la situación presente y de evaluar su comportamiento, en términos de producción de bienes y servicios, bajo distintos escenarios (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2012).

En este capítulo se obtuvieron los mapas de aptitud para los usos de suelos considerados y un mapa de usos múltiples. A partir del mapa de usos múltiples se cuantificaron las áreas con aptitud para un único uso, las áreas de usos complementarios (que se pueden integrar en una misma unidad) E-C y F-G o posibles usos en conflicto (espacialmente excluyentes) por ej. A-C, A-G, C-G.

Tabla 3.27. Superficies en ha de áreas aptas para uso único, usos complementarios y usos en conflicto.

Usos	Superficie apta	Uso único	Usos complementarios	Usos en conflicto
Agricultura	157.875	900		156.975
Ap. Forestal del bosque nativo	656.576	63.325	198.081	395.170
Ecoturismo	546.508	64.031	143.694	338.783
Conservación	601.520	11.719	143.694	446.107
Ganadería	1.763.931	984.631	198.081	581.219

A partir de los objetivos definidos (si hubiera consenso), se pueden priorizar y asignar los usos de suelos, de manera iterativa, según el orden de priorización. En la planificación de uso del suelo, debido a que las ideas, valores y actitudes varían entre los actores involucrados, inevitablemente surgen una variedad de conflictos (Zhang et al., 2012). Para estos casos, se propusieron diferentes enfoques. A continuación se hace mención a dos de ellos, como alternativas de implementación, debido a que se basan en la utilización de herramientas de SIG, EMC y lógica difusa a partir de los mapas de aptitud de uso y el mapa de usos múltiples.

El primer caso utiliza un enfoque de mayoría difusa para la toma de decisiones grupales, basada en multicriterio y SIG (Borouhaki y Malczewski, 2010). Este involucra dos etapas: en la primera se crean mapas soluciones de tomadores de decisiones individuales, luego los mapas individuales son combinados usando el procedimiento mayoría difusa para generar el mapa de solución grupal que sintetice las preferencias de la mayoría de los tomadores de decisión.

Zhang et al. (2012) propusieron un procedimiento para la resolución de conflictos en la planificación de uso de la tierra. Analizaron dos puntos importantes en

la planificación de uso de la tierra: la asignación de usos de la tierra y la deliberación de propuestas de uso de la tierra. En este marco propusieron un modelo de resolución de conflictos espacial, basado en técnicas EMC y SIG para ayudar a los actores y planificadores a formular propuestas de uso de la tierra específicas a través de un proceso de modificación iterativo. Por otro lado, utilizaron técnicas de análisis de impacto para facilitar el análisis de los actores de posibles consecuencias, causadas por las diferentes propuestas.

3.5.2. A cerca de la metodología

Se utilizaron datos primarios disponibles para todo el país de tal forma que la metodología puede utilizarse en otras zonas o a escala nacional.

En el modelo de CAU para ecoturismo se asoció una función sigmoïdal creciente a los criterios F7- Efecto de red vial y F8 – Distancia a centros poblados, pero se podría utilizar una función sigmoïdal simétrica como alternativa (tipo 7, Figura 3.6) de modo de considerar tanto el incremento de la calidad escénica del paisaje a medida que nos alejamos a cierta distancia de los centros poblados, como la disminución de la accesibilidad de servicios básicos a partir de los 50 Km.

Los mapas de aptitud son el insumo para la generación de propuestas de OT rural, teniendo en cuenta las potencialidades y limitaciones biofísicas, socio-económicas y político-institucionales.

Es posible usar la lógica difusa en la etapa de ponderación, para que los decisores puedan especificar sus preferencias con respecto al nivel de importancia de los criterios de evaluación (pesos) a través de un conjunto de términos lingüísticos como “bajo”, “medio”, “alto” (Borouhaki y Malczewski, 2010).

La generación del plugin facilita la realización de los procesos descritos y facilita por tanto un mayor involucramiento de los actores generando diferentes soluciones en base a las variables, ponderaciones derivadas de sus juicios de valor, dando transparencia al proceso y contribuyendo, de esta manera, a una planificación participativa. El método es aplicable a diferentes escalas de trabajo y puede tener mayor sustento técnico-científico con el aporte de diferentes actores del territorio: ONGs, instituciones gubernamentales, organizaciones sociales, instituciones científicas y técnicas entre otras. En este sentido la utilización de la lógica difusa, a través de la utilización de términos lingüísticos, en la generación de reglas y/o en la ponderación, permite la participación de actores sociales que tengan dificultades o sean reticentes a proveer valores precisos.

3.6. Bibliografía

- Beaumont Fantozzi, M. 2014. El Rey- Parque Nacional, Salta. Patrimonio Natural.
- Bianchi, A y S. Cravero. Atlas Climático Digital de la República Argentina. 2010.
<http://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina-1/>
 Consultado 15/01/15
- Borouhaki, S. & J. Malczewski. 2010. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision-making. *Computers & Geosciences* 36(3): 302-312.
- Bunruamkaew, K. & Y. Murayama. 2011. Site Suitability Evaluation for Ecotourism Using GIS & AHP: A Case Study of Surat Thani Province, Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 21(0): 269-278.
- CGIAR-CSI, <http://srtm.csi.cgiar.org/>. The CGIAR Consortium for Spatial Information. Consultado 10/10/13
- Chen, S. & C. Hwang. 1992. En: *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Springer-Verlag, Berlin, Germany 536 pp.
- CITAB. 2004. Partido de Rivadavia, Actividad Agropecuaria. Centro de Investigaciones Territorial y Ambientales Bonaerenses. Edición Banco Provincia de Buenos Aires, La Plata, Argentina.
- Dirección General de Inmuebles de Salta, <http://www.inmuebles-salta.gov.ar/>. Catastro de Salta.
- Eastman, R. 2006. *Idrisi Andes: Guide to GIS and image processing*. Lark Labs, Clark University, Worcester, USA.
- FAO. 1976. *A Frame Work for Land Evaluation (Soils Bulletin No. 32)*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.
- Feizizadeh, B., T. Blaschke. 2013. Land suitability analysis for Tabriz County, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS. *J. Environ. Plann. Manag.* 56, 1–23.
- Feizizadeh, B., P. Jankowski & T. Blaschke. 2014. A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computers & Geosciences* 64(0): 81-95.
- Fernández G., S. Valenzuela, S. Ricci, R. Castronovo & A. Ramos. 2014. Capacidad de acogida del territorio para usos recreativo-educativos en una cantera inactiva de Tandil, Buenos Aires, Argentina. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Volumen 2 N° 1, año 2014 ISSN: 2347-0941
- Gómez Delgado, M. & J. Barredo Cano. 2005. *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. 2da edición. Editorial Alfaomega-Ra-Ma.

- Gómez Orea, D. 1992. Evaluación de Impacto Ambiental. Editorial Agrícola Española S.A. Madrid, 222 p.
- Gómez Orea, D. 2008. Ordenación territorial [Monografías]. 2ª ed. rev. y amp. Madrid: Mundi-Prensa, 766 p.
- Hossain, M. & N. Das. 2010. GIS-based multi-criteria evaluation to land suitability modelling for giant prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) farming in Companigonj Upazila of Noakhali, Bangladesh. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1): 172-186.
- IGN. 2012. Sistema de Información Geográfica SIG250. Especificaciones Técnicas. Instituto Geográfico Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- INDEC. 2011. Censo nacional de población, hogares y Viviendas 2010. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Buenos Aires, Argentina.
- Jelokhani-Niaraki, M. & J. Malczewski. 2015. A group multicriteria spatial decision support system for parking site selection problem: A case study. *Land Use Policy* 42: 492-508.
- Malczewski, J. 2010. Multiple criteria decision analysis and geographic information systems. In M. Ehrgott, J. Figueira & S. Greco (Eds.), *Trends in multiple criteria decision analysis* (pp. 369–395). New York: Springer.
- Marinoni, O. 2004. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers & Geosciences*, 30(6): 637-646.
- Méndez Casariego, H. & C. Pascale Medina. 2014. Ordenamiento Territorial en el Municipio: una guía metodológica. FAO. Santiago, Chile. 72 pp.
- Merenson, C. 2008. Presentación de la Ley 26.331 de Bosques Nativos y sus aspectos reglamentarios. Salta, Casa de la Cultura, mayo 2008. Salta, Argentina.
- Ministerio de Cultura y Turismo de la Provincia de Salta,
<http://turismo.salta.gov.ar/puntos-turisticos-salta-gps>. Consultado 1/04/15
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2012. Bases para el Ordenamiento del Territorio Rural Argentino. Ed. Minagri.
- Ministerio de Desarrollo sostenible y Planificación, Viceministerio de Planificación estratégica y Participación Popular, Dirección General de Planificación y Ordenamiento Territorial, Unidad de Ordenamiento Territorial. Documento de Trabajo. 2010. Guía metodológica para la formulación de planes de ordenamiento territorial. La Paz, Bolivia. Disponible en http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADT963.pdf . Consultado Marzo/2012.
- Morales Ponclava, M., L. Lizarraga, H. Elena, Y. Noé, J. Mosciaro, L. Vale, H. Paoli, y J. Volante. 2012. Uso del suelo en el noroeste argentino (NOA) mediante Land Cover Classification System (LCCS-FAO) - Año 2007. Inedito.
- Morales Ponclava, M., L. Lizarraga, H. Elena, Y. Noé, J. Mosciaro, L. Vale, H. Paoli, y J. Volante. 2012. Cobertura del suelo en el noroeste argentino (NOA) mediante Land Cover Classification System (LCCS-FAO) - Año 2007. Publicado en Congreso Argentino de Teledetección 2012, Cordoba, Argentina.

- Morales Ponclava, C., R. Sobral, V. Nakama, J. Volante & A. Bianchi. 2015. Evaluación de tierras mediante métodos paramétricos. Ajuste del sistema índice de productividad (IP) y su aplicación mediante herramientas SIG para las provincias de salta y jujuy. 1a ed. - Salta : Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-662-4
- Nakama, V. y R. Sobral. 1985. Índice de Productividad. Método Paramétrico de Evaluación de Tierras. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca-INTA Documento del Proyecto PNUD Arg. 85/019. Buenos Aires. Argentina.
- Paruelo, J. y M. Vallejos. 2013. En prensa. Ecosystem Services Related to Carbon Dynamics: Its Evaluation Using Remote Sensing Techniques. En Alcaraz Segura D., C. Di Bella y J. Straschnoy (eds.) Earth Observation of Ecosystem Services. CRC Press.
- Paruelo, J., E. Jobbágy, P. Litter, H. Dieguez, M. García Collazo y A. Panizza (Eds.). 2014. Ordenamiento Territorial Rural Conceptos, métodos y experiencias. FAO-FAUBA-MINAGRI.
- QGIS, <https://plugins.qgis.org/plugins>. Consultado el 10 de Junio de 2014.
- Recalde, D. & J. Zapata, R. 2009. La Ordenación del Territorio Instrumento en la gestión de los Recursos Naturales. Serie Publicaciones del Área de Investigación del INTA EEA La Rioja. ISSN 1669-323X. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-la_ordenacin_del_territorio.pdf. Consultado 2/03/2017.
- Reshmidevi, T., T. Eldho & R. Jana. 2009. A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems* 101: 101-109.
- Romero, C. 1993. Teoría de la Decisión Multicriterio: Conceptos, Técnicas y Aplicaciones. Madrid, Alianza.
- Ross T. 1997. Fuzzy Logic with Engineering Applications McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Running, S., P. Thornton, R. Nemani y J. Glassy. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth. *Observing System, Methods in Ecosystem Science*, Springer, 45-57.
- Saaty, T. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structure. *J. Math. Psychol.* 15 (3): 234–281.
- Saaty, T. 1980. *The Analytical Hierarchy Process*. New York, Mc Graw Hill.
- Saaty, T. 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
- Sistema Federal de Áreas Protegidas, SIFAP, www.sib.gov.ar/mapa-sifap. Consultado 4/11/2014.
- Somma, D, J. Volante, L. Lizárraga, M. Boasso et al. 2011. Aplicación de análisis multicriterio multiobjetivo como base de un sistema espacial de soporte de

decisiones para la planificación del uso sustentable del territorio en regiones forestales. Caso de estudio: los bosques nativos de la provincia de salta. Capítulo 18. En Laterra, P., E. Jobbágy & J. Paruelo (Eds.), Valoración de servicios ecosistémicos: conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. INTA, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-987-679-018-5.

Stewart, T., R. Janssen, et al. 2004. A genetic algorithm approach to multiobjective land use planning. *Computers & Operations Research* 31(14): 2293-2313.

Stewart, T. J. & R. Janssen. 2014. A multiobjective GIS-based land use planning algorithm. *Computers, Environment and Urban Systems* 46(0): 25-34.

USGS, Servicio Geológico de EE.UU, <http://glovis.usgs.gov>. Consultado el 10 de Junio de 2014.

Wang, F., G. Hall, Subaryono, 1990. Fuzzy information representation and processing in conventional GIS software: database design and application. *International Journal of Geographic Information Sciences* 4 (3), 261–283.

Weyland, F. 2005. Factores estructurales y dinámicos que regulan la diversidad de aves en agroecosistemas pampeanos. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires. Disponible en <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2011weylandfederico.pdf>. Consultado 2/05/2017.

Xu, E. & H. Zhang. 2013. Spatially-explicit sensitivity analysis for land suitability evaluation. *Applied Geography* 45(0): 1-9.

Yager, R., D. Filev. 1994. *Essentials of Fuzzy Modeling and Control* John Wiley & Sons, Inc., New York.

Zadeh, L. 1965. Fuzzy sets. *Information and Content* 8 (3), 338–353.

Zhang, Y., A. Li & T. Fung. 2012. Using GIS and Multi-criteria Decision Analysis for Conflict Resolution in Land Use Planning. *Procedia Environmental Sciences* 13(0): 2264-2273.

CAPÍTULO 4: Análisis de sensibilidad e incertidumbre

4.1. Introducción

La evaluación multicriterio en entorno SIG es cada vez más usada en la planificación del uso de la tierra (Malczewski, 2006; Bunruamkaew y Murayama, 2011; Chen y Paydar, 2012; Feizizadeh et al., 2014; Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2014), sin embargo las incertidumbres asociadas con las técnicas de EMC son inevitables y los resultados están sujetos a múltiples fuentes de incertidumbre (Burgman, 2005; Chen et al., 2010; Xu y Zhang, 2013) tales como la selección de criterios y sus umbrales, la exactitud de los datos de entrada, los métodos de estandarización, el cálculo de los pesos, y los métodos de agregación entre otros. Las técnicas de EMC en general y las de evaluación de capacidad de acogida de usos de la tierra en particular, deben ser evaluadas para asegurar su robustez bajo un amplio rango de condiciones posibles, donde la robustez es definida como una respuesta mínima de las salidas o los resultados del modelo a cambios en sus entradas (Gómez-Delgado y Bosque-Sendra, 2004; Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2012).

Cuando los modelos son usados para asistir en la toma de decisiones es importante asegurar que la solución sea robusta y que los resultados (niveles de aptitud para cada uso) no se alterarán sensiblemente ante (pequeños) cambios en las entradas (Ravalico et al., 2010). Para abordar esta cuestión diversos autores consideran que es prioritario incorporar el análisis de sensibilidad e incertidumbre como una etapa importante que dé cuenta de la incertidumbre inherente en el proceso, aportando a una mejor comprensión de los resultados (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005; Chen et al., 2010; Xu y Zhang, 2013)

Un modelo tiene como elementos: a) las *variables*, que son valores que describen cuantitativamente los fenómenos, variando en el espacio y en el tiempo, se clasifican en variables de entrada y variables de salida y, b) *los parámetros* que son valores que caracterizan el sistema. En este caso, cuando nos referimos a las entradas, se incluyen los factores (variables de entrada) y sus pesos (parámetros).

El análisis de incertidumbre cuantifica la variabilidad de los resultados dada la incertidumbre de las entradas del modelo, mientras que el análisis de sensibilidad subdivide esta variabilidad y la adjudica a la incertidumbre de las entradas (Ligmann-Zielinska y Jankowski, 2014, Feizizadeh et al., 2014). Conceptualmente los análisis de sensibilidad e incertidumbre representan dos enfoques complementarios para cuantificar el efecto de las distintas fuentes de variabilidad en los resultados del modelo (Tenerelli y Carver, 2012)

Los métodos para el análisis de sensibilidad se pueden agrupar en dos tipos: los métodos de análisis local y los métodos de análisis global. El análisis de sensibilidad local cambia una entrada a la vez (mientras mantiene las demás constantes) y observa los cambios resultantes en la salida del modelo. Este método es conocido con el nombre de One-Factor-AT-A-Time (OAT, Daniel 1958). Este método es intuitivo, permite realizar un análisis de datos espacial exploratorio permitiendo manipular las entradas de manera interactiva, no requiere conocimientos a priori sobre análisis de sensibilidad y es muy eficiente computacionalmente (Ligmann-Zielinska y Jankowski 2014). Sin embargo el enfoque OAT tiene algunas limitaciones. Si bien da la posibilidad de cambiar arbitrariamente las entradas, es difícil decidir cuáles cambiar y en que magnitud y no toma en cuenta las interacciones potenciales entre los componentes del modelo, es decir, no provee información cuantitativa sobre la contribución conjunta de una entrada que interactúa con otras, a la variabilidad de los resultados del modelo.

A diferencia de los métodos de análisis de sensibilidad local, los enfoques de sensibilidad global asignan la incertidumbre de los resultados a la incertidumbre de las entradas, mediante el enfoque de muestreo de las variables o parámetros de entrada a partir de funciones de densidad de probabilidad, los cuales se varían simultáneamente y las sensibilidades se calculan sobre el rango de variación completo de las entradas. Uno de los métodos de sensibilidad global más usados es el método de Sobol (Saltelli et al., 2000, 2008). Este permite muestrear cada variable o parámetro a partir de una función de distribución de probabilidad considerando el efecto de su variación simultánea, y no requiere que el modelo sea aditivo o lineal (Saltelli et al., 2004). El método de Sobol permite descomponer la varianza de la salida usando simulación Montecarlo en índices de sensibilidad global que representan la contribución de cada parámetro o variable del modelo a la varianza de la salida. Los índices de sensibilidad pueden ser de primer orden y de sensibilidad total. Los índices de primer orden miden la influencia promedio de un parámetro o variable sobre la salida del modelo, pero no toman en cuenta los efectos de interacción con las demás entradas. Los índices de sensibilidad total dan cuenta de la contribución total de un parámetro o variable dado incluyendo sus interacciones con otros.

En este capítulo se aplica el método de Sobol para llevar a cabo el análisis de sensibilidad e incertidumbre de los modelos de evaluación de capacidad de acogida para los usos desarrollados en el capítulo III.

En primer lugar, como ejemplo sobre la forma de informar e interiorizar a los actores sociales implicados en el proceso de planificación acerca de la importancia del análisis y contribuir al proceso de toma de decisiones grupales y planificación participativa, se realizaron ejercicios de simulación (Gómez Delgado y Bosque Sendra 2004), variando : a) las ponderaciones (i.e. las diferentes perspectivas de los decisores), b) la cantidad de criterios considerados y c) a los métodos de evaluación utilizados.

En segundo lugar se realizó el análisis de sensibilidad e incertidumbre en base a una adaptación del marco iUSA v1 (Integrated Uncertainty and Sensitivity Anlysis, Ligmann-Zielinska y Jankowski 2014) a través del cual se evaluó la variabilidad de los resultados como respuesta a las variaciones de los pesos de los criterios, ya que usualmente constituyen uno de los componentes más subjetivos de cualquier análisis de decisión multicriterio y afectan significativamente sus resultados (Malczewski, 1999; Feizizadeh et al., 2014)

4.2. Objetivos

Cuantificar la variación de los resultados (la capacidad de acogida para un uso) a partir de la variación de las ponderaciones derivadas de diferentes juicios de valor, de la cantidad de criterios y de los métodos de evaluación utilizados.

Aplicar un método de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito para evaluar la robustez de los modelos de capacidad de acogida para los usos considerados a las variaciones en los pesos.

Generar un script que permita obtener los mapas de sensibilidad e incertidumbre a las variaciones de los componentes de los modelos de capacidad de acogida.

4.3. Materiales y métodos

4.3.1. Cuantificación de la variación de los resultados a partir de los cambios de definición de los modelos.

Utilizando la base de datos de factores y restricciones generada en el Capítulo III y un script desarrollado a tal efecto se cuantificaron y mapearon las variaciones de los resultados debidas a: a) diferentes perspectivas de los decisores (ponderaciones), b) a la cantidad de criterios considerados y c) a los métodos de evaluación utilizados. En los 3 casos (a, b, c) los mapas resultantes fueron reescalados en 4 clases de aptitud: tierras altamente aptas (S1), moderadamente aptas (S2), marginalmente aptas (S3) y no aptas (N) según lo especificado en la Tabla 3.24, para facilitar la comparación visual y numérica con respecto a los mapas de aptitud obtenidos en el Capítulo 3 (tomados como mapas de referencia).

Para cuantificar los cambios de una clase a otra se calculó el índice Kappa propuesto por Cohen (1960):

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (4.1)$$

Siendo P_o la proporción de acuerdos observados y P_e la proporción de acuerdos esperados bajo el supuesto de independencia entre las ejecuciones del modelo, tomando la escala de valoración definida por Landis y Koch (1977) para calificar la concordancia de cada variación respecto de la original (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Valoración del coeficiente Kappa (Landis y Koch, 1977)

Coeficiente Kappa	Fuerza de la concordancia
0,00	Pobre
0,01 – 0,20	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Considerable
0,81 – 1,00	Casi perfecta

También se calculó la Incertidumbre Media Cuadrática (IMC, Gomez Delgado y Bosque Sendra, 2004b) para obtener un valor para cada píxel que exprese la diferencia media de los escenarios respecto al modelo original:

$$IMC_{pixel} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (CAU_i - CAU_R)^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

Donde CAU_i es la capacidad de acogida obtenida a partir del modelo modificado en cada uno de las ejecuciones, CAU_R es la capacidad de acogida obtenida en la ejecución del modelo original y n el número de ejecuciones. Por ejemplo, en el caso de variar las ponderaciones a partir de los juicios de 3 decisores (D_1 , D_2 y D_3) con respecto a un decisor referente (D_R), el IMC de un píxel, se calcula a partir de CAU_1 , CAU_2 y CAU_3 que son las capacidades de acogida obtenidas a partir de las ponderaciones de D_1 , D_2 y D_3 respectivamente, CAU_R que es la capacidad de acogida obtenida a partir de la ponderación de D_R y n que es igual a 3. La Figura 4.1 muestra el esquema metodológico utilizado para realizar el análisis de sensibilidad e incertidumbre de los modelos de CAU.

referencia (ponderaciones utilizadas en el capítulo III). EO significa extremadamente optimista, MO muy optimista, O optimista, N neutral, P pesimista, MP muy pesimista, EP extremadamente pesimista.

a) Cuantificación de la variación de los resultados a partir de diferentes ponderaciones.

Se pidió a 4 profesionales (D1, D2, D3, D4, Tabla A10, Apéndice A) que completen las matrices de comparación por pares (Saaty, 1977) de los factores considerados para cada TUT, a partir de las cuales se derivaron los pesos y razones de consistencia (CR), Tabla 4.2.a a Tabla 4.2.e. Se aplicó (para cada TUT) el algoritmo esquematizado en la Figura 4.2. Se usó como método de agregación la Combinación Lineal Ponderada (Ecuación 3.1). Se calcularon los coeficientes de Kappa y el IMC (ecuaciones 4.1 y 4.2 respectivamente).

Tabla 4.2.a. Pesos de los factores de evaluación de CAU para agricultura derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D2, D3, D4) y razón de consistencia de la matriz.

Factores	Pesos D2	Pesos D3	Pesos D4
F1	0,18	0,47	0,37
F2	0,20	0,15	0,13
F3	0,51	0,19	0,35
F4	0,07	0,13	0,05
F5	0,05	0,06	0,10
CR	0,082	0,099	0,026

Tabla 4.2.b. Pesos de los factores de evaluación de CAU para aprovechamiento forestal del bosque nativo derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D3, D4) y razón de consistencia de la matriz.

Factores	Pesos D1	Pesos D3	Pesos D4
F1	0,25	0,36	0,23
F2	0,27	0,39	0,17
F3	0,11	0,07	0,22
F4	0,08	0,05	0,20
F5	0,29	0,12	0,18
CR	0,024	0,067	0,071

Tabla 4.2.c. Pesos de los factores de evaluación de CAU para ecoturismo derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D2, D4) y razón de consistencia de la matriz.

Factores	Pesos D1	Pesos D2	Pesos D4
F1	0,10	0,18	0,11
F2	0,07	0,11	0,14
F3	0,06	0,23	0,24
F4	0,04	0,03	0,13
F5	0,12	0,02	0,02
F6	0,03	0,20	0,29
F7	0,20	0,13	0,02
F8	0,38	0,10	0,04
CR	0,095	0,089	0,095

Tabla 4.2.d. Pesos de los factores de evaluación de CAU para conservación derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D2, D4) y razón de consistencia de la matriz.

Factores	Pesos D1	Pesos D2	Pesos D4
F1	0,05	0,17	0,16
F2	0,04	0,15	0,15
F3	0,05	0,15	0,17
F4	0,03	0,15	0,08
F5	0,02	0,08	0,16
F6	0,15	0,07	0,01
F7	0,17	0,06	0,05
F8	0,20	0,04	0,09
F9	0,23	0,02	0,05
F10	0,02	0,07	0,06
F11	0,03	0,03	0,01
CR	0,07	0,06	0,097

Tabla 4.2.e. Pesos de los factores de evaluación de CAU para ganadería derivados de la Matriz de comparación por pares de 3 profesionales (D1, D2, D3) y razón de consistencia de la matriz.

Factores	Pesos D1	Pesos D2	Pesos D3
F1	0,19	0,07	0,25
F2	0,06	0,05	0,18
F3	0,19	0,20	0,15
F4	0,20	0,11	0,23
F5	0,03	0,08	0,02
F6	0,13	0,08	0,10
F7	0,04	0,38	0,02
F8	0,16	0,03	0,04
CR	0,082	0,052	0,038

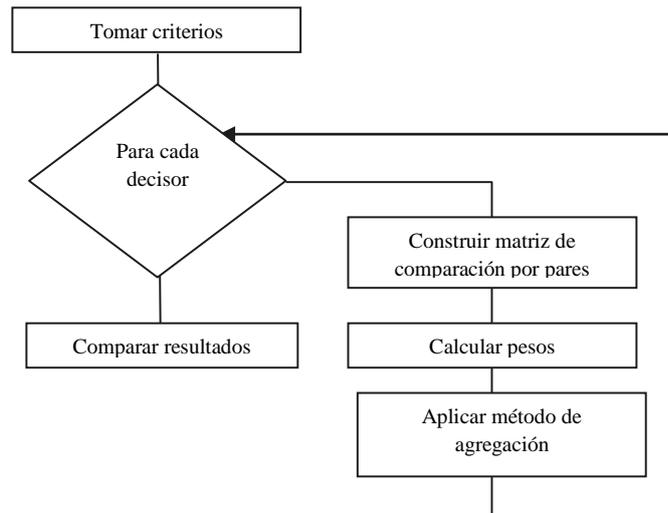


Figura 4.2. Algoritmo para cuantificar las variaciones de los resultados de capacidad de acogida para los diferentes usos de acuerdo a diferentes ponderaciones derivadas de perspectivas diferentes de los decisores. Los rectángulos representan procesos, el lazo del rombo incluye procesos que se repiten para cada decisor. Luego de aplicar el método para todos los decisores, se comparan los resultados.

b) Cuantificación de la variación de los resultados a partir de la cantidad de criterios considerados.

Este análisis se realizó extrayendo de manera sucesiva los criterios de menor importancia según sus valores de pesos en base a las ponderaciones de las Tablas 3.19 a 3.23, asumiendo que estos criterios no contribuyen de manera decisiva a la variación de los resultados, hasta un mínimo de 3 factores (Figura 4.3). Los pesos se recalcularon en base a la matriz reducida derivada de la matriz de comparación por pares utilizada en el capítulo 3 al extraer las filas y columnas de los factores a omitir. Se verificó su consistencia en base al CR. Se usó como método de agregación la Combinación Lineal Ponderada (Ecuación 3.1). Se calcularon los coeficientes de Kappa y el IMC (ecuaciones 4.1 y 4.2 respectivamente).

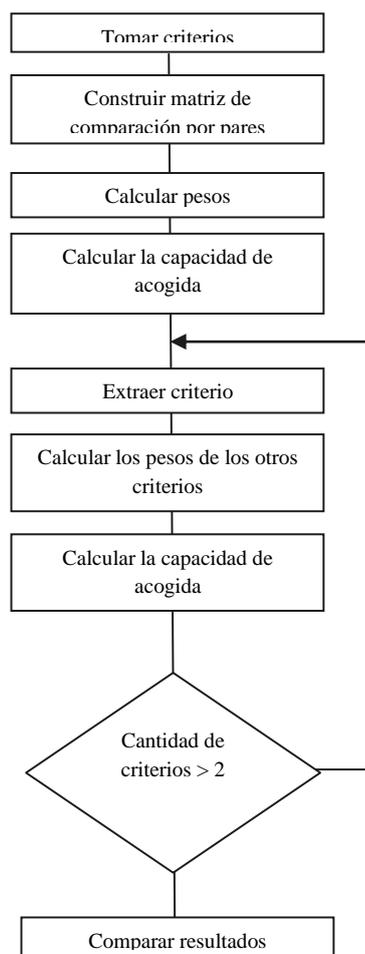


Figura 4.3. Algoritmo para cuantificar las variaciones de los resultados de capacidad de acogida para los diferentes usos de acuerdo a la cantidad de criterios considerados en el modelo de decisión. Los rectángulos representan procesos, el lazo del rombo incluye procesos que se repiten mientras queden más de 2 criterios. Luego de aplicar el método para todos los subconjuntos de criterios, se comparan los resultados.

- c) Cuantificación de la variación de los resultados a partir de los métodos de evaluación utilizados.

Las reglas de decisión en un contexto de EMC basada en SIG involucran combinar los datos espaciales relevantes (valores de atributos) y preferencias establecidas por los actores para obtener una valoración total de las alternativas sometidas a evaluación (Jelokhani-Niaraki y Malczewski, 2015). Jankowski (1995) clasifica las reglas de decisión o métodos de EMC en compensatorios, no compensatorios y borrosos.

Las primeras se basan en la suposición de que uno o más criterios con un valor elevado pueden compensar el bajo nivel de otros criterios de la misma alternativa, en función de la estructura de preferencia del decisor. En las segundas la puntuación baja de un criterio no puede ser compensada por la mayor valoración de otros criterios. Finalmente el tercer grupo engloba a las técnicas compensatorias adaptadas a la filosofía de la lógica difusa.

Los métodos más comúnmente usados son la combinación lineal ponderada (método compensatorio) y las operaciones de superposición booleana (método no compensatorio). El método que se utilizará en este apartado, el promedio ponderado ordenado (por sus siglas en inglés, OWA) se considera una técnica borrosa.

Para analizar la incertidumbre asociada a los métodos de EMC, se utilizará el enfoque utilizado por Jelokhani-Niaraki y Malczewski (2015) a través del cual generaliza estos dos métodos por medio del OWA propuesto por Yager (1988).

Para un conjunto de n criterios, un operador OWA puede ser definido como una función que tiene un conjunto de pesos de orden asociados $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$; $v_j \in [0,1]$ para $j = 1, 2, \dots, n$ y $\sum_{j=1}^n v_j = 1$. Dado un conjunto de valores de atributos estandarizados $A_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}]$ para $i = 1, 2, \dots, m$, donde $a_{ij} \in [0,1]$ es el atributo j -ésimo asociado con la alternativa i , m es el número de alternativas, el operador OWA se define de la siguiente manera:

$$OWA_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}) = \sum_{j=1}^n v_j z_{ij} \quad (4.3)$$

Donde $z_{i1} \geq z_{i2} \geq \dots \geq z_{in}$ es la secuencia obtenida al reordenar los valores de atributos $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$. El proceso de reordenación es central para el operador OWA. Este involucra asociar un peso, v_j , con una posición ordenada particular de los valores de atributos $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}$ de la alternativa i -ésima. El primer peso de orden v_1 es asignado al valor de atributo más alto de la alternativa i , v_2 es asignado al segundo valor más alto y así sucesivamente, asignando el peso v_n al valor de atributo más bajo.

El método de agregación se focaliza en los pesos de orden, e ignora el conjunto de pesos asignados a los criterios. Para abordar este problema, Yager (1997) propuso un enfoque por el cual se modifican los pesos de los atributos para generar los pesos de orden incluyendo los pesos de los criterios según la ecuación 4.4.

$$v_j = \left(\sum_{l=1}^j u_l \right)^\alpha - \left(\sum_{l=1}^{j-1} u_l \right)^\alpha \quad (4.4)$$

Donde u_j es el peso del atributo j (w_j) reordenado de acuerdo a los valores de atributos reordenados z_{ij} . De esta manera el operador OWA_i se define a través de la ecuación 4.5.

$$OWA_i = \sum_{j=1}^n \left(\left(\sum_{l=1}^j u_l \right)^\alpha - \left(\sum_{l=1}^{j-1} u_l \right)^\alpha \right) z_{ij} \quad (4.5)$$

El valor de α está relacionado a una medida de compensación: $ORness = 1/(1+\alpha)$, $\alpha \geq 0$. $ORness$ varía entre 0 y 1 e indica la posición del operador OWA sobre un continuo entre las reglas de combinación AND y OR como se muestra en la Figura 4.4.

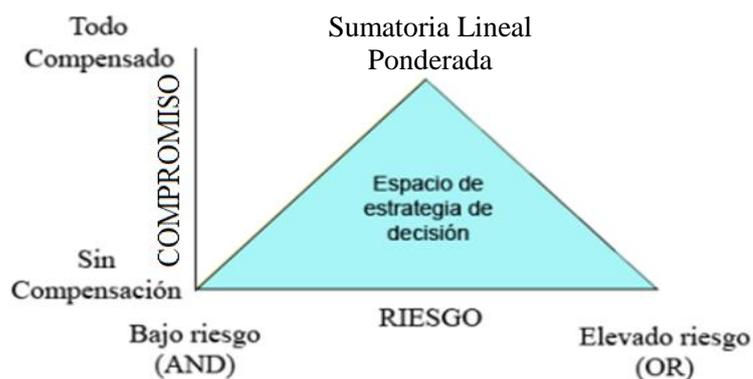


Figura 4.4. Método OWA: espacio de decisión en función del riesgo y la compensación asumidos. Fuente Eastman, 2003.

Esta técnica permite controlar el riesgo y la incertidumbre asociada a cualquier toma de decisiones (Eastman, 2003). Con diferentes valores de ORness (o parámetros α) se generaron diferentes conjuntos de pesos OWA y una variedad de estrategias de combinación que varían entre una combinación de tipo mínima (AND lógico) la cual es muy conservativa o de aversión al riesgo, pasando por todos los tipos intermedios (incluyendo el WLC convencional) hasta una combinación de tipo máxima (OR lógico) o de elevado riesgo. Mientras que el AND lógico requiere que todos los atributos se cumplan para que una alternativa se considere apta (se considera el valor de atributo más bajo), el OR lógico requiere que al menos un atributo (se considera el valor de atributo más alto) se cumpla. Los pesos de orden controlan como se agregan los factores ponderados. De esta manera es posible determinar el nivel total de compensación permitido (Malczewski, 2006b; Boroushaki y Malczewski, 2008). La Tabla 4.3 (Extraída de Jelokhani-Niaraki y Malczewski, 2015) muestra los pesos de orden y los correspondientes métodos de combinación/ decisión para valores específicos de ORness (o parámetros α) que se utilizarán en este capítulo. En este contexto las estrategias de decisión extremadamente optimista y extremadamente pesimista, adoptan el valor máximo o mínimo de los factores considerados, se asume el máximo o mínimo riesgo en la toma de decisiones, no permitiendo compensación alguna. Las estrategias intermedias varían de acuerdo al riesgo y a la compensación, pasando por una estrategia neutral (WLC convencional), Figura 4.4.

Tabla 4.3. Pesos de orden y los correspondientes métodos de combinación para diferentes valores de ORness (o parámetros α)

α	ORness	Pesos OWA (v_j)	Métodos de combinación	Estrategia de decisión
0	1.0	$v_1=1; v_j=0$ para otros	OR Lógico (MAX)	Extremadamente optimista
0.1	0,9	a	a	Muy optimista
0,5	0.6	a	a	Optimista
1	0.5	$v_j=w_j$ para todos los j	WLC	Neutral
2	0.3	a	a	Pesimista
10	0.1	a	a	Muy pesimista
∞	0.0	$v_n=1; v_j=0$ para otros	AND Lógico (MIN)	Extremadamente pesimista

^a Estos valores son dependientes del caso

Para comparar los efectos compensatorios de las diferentes estrategias de decisión se mapearon los resultados y se calcularon las superficies de cada uno de los niveles de aptitud derivados.

Para implementar la cuantificación de la variación de los resultados a partir de los cambios de definición de los modelos, casos a), b) y c) se implementaron scripts y plugins de Python y R.

4.3.2. Aplicación de un método de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito.

En este apartado se utilizará la metodología esquematizada en la Figura 4.5.

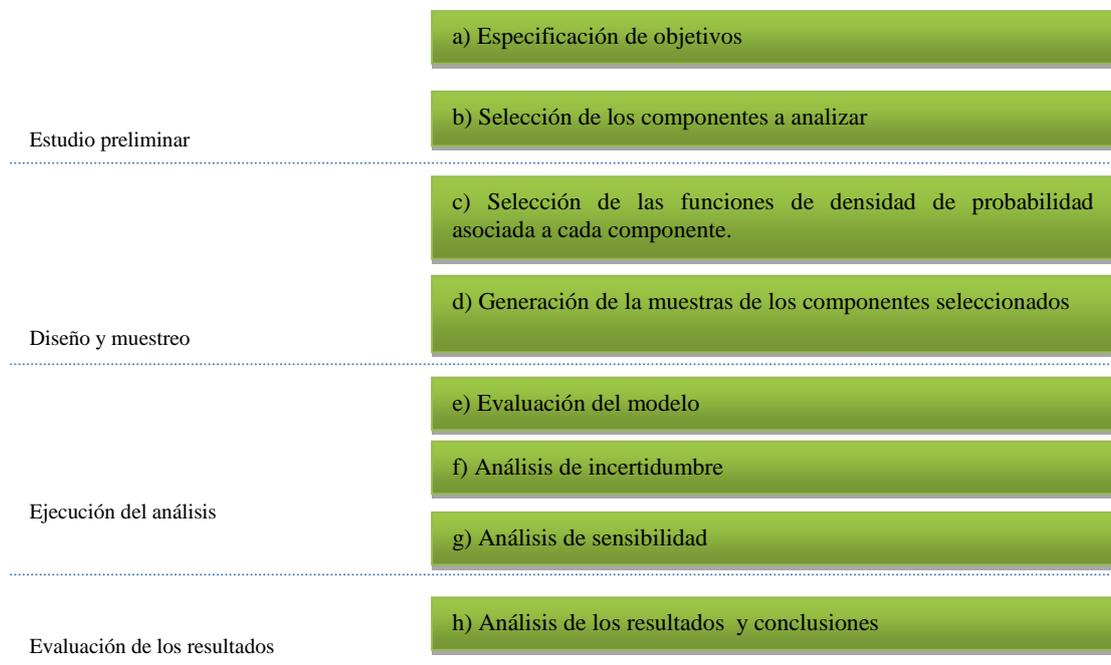


Figura 4.5. Metodología de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícita.

La metodología de análisis y sensibilidad (Figura 4.5) se aplicó del siguiente modo:

a) El objetivo del análisis es evaluar la robustez de los modelos de capacidad de acogida para los usos considerados a las variaciones en los pesos, obteniendo un mapa de aptitud promedio, un mapa de incertidumbre y mapas de sensibilidad.

b) Los componentes a evaluar son los pesos de los criterios ya que usualmente constituyen uno de los componentes más subjetivos de cualquier análisis de decisión multicriterio y afectan significativamente sus resultados (Malczewski, 1999; Feizizadeh et al., 2014)

c) Selección de las funciones de densidad de probabilidad: Los valores de los pesos asociados a los criterios considerados para evaluar la CAU fueron muestreados

desde una función de distribución de probabilidad uniforme en el rango [0.0,1.0], donde cada elemento tiene la misma probabilidad de ser seleccionado.

d) Generación de las muestras de los pesos seleccionados: Se ejecutaron simulaciones de Monte Carlo siguiendo el método propuesto por Saltelli et al (2010) y utilizado por Ligmann-Zielinska y Jankowski (2014) para barrer el espacio de los pesos a través de la generación aleatoria de 2 listas independientes de n ($n = 20000$) muestras de k pesos, referidas como N_A y N_B , a partir de la función de distribución de probabilidad uniforme asociada a cada peso. Las listas se usaron como entrada del método *sobol2002* del paquete sensitivity de R (Pujol et al., 2015) para generar R muestras de pesos, mediante la combinación de los valores de las listas, donde $R = (K+2) \times n$, véase la Tabla 4.4. Los valores de los pesos (w_j) de cada muestra fueron

transformados a través de la ecuación $\frac{w_j}{\sum_{i=1}^K w_i}$ para que cumplan con la condición de que su sumatoria sea 1.

Tabla 4.4. Tamaño de las muestras de pesos para los usos evaluados en base a la cantidad de factores considerados

Uso del suelo	N° de factores y pesos (K)	Cantidad de muestras de pesos obtenidos a partir de las listas N_A y N_B , $R = (K+2) \times n$
Agricultura	5	140000
Ap. Forestal del bosque nativo	5	140000
Ecoturismo	8	200000
Conservación	11	260000
Ganadería	8	200000

e) Evaluación del modelo: Se corrieron R veces los modelos, generando R mapas de aptitud, a partir de los cuales se realizaron el análisis de sensibilidad e incertidumbre.

f) Análisis de incertidumbre: A partir de los R mapas de aptitud, se obtuvieron un mapa de aptitud promedio y un mapa de desvío estándar que muestra la distribución espacial de la incertidumbre. El método permite identificar regiones críticas de aptitud, siendo de interés especial aquellas con aptitud media alta y desvío estándar bajo (regiones robustas) y las de aptitud media alta y desvío estándar alto (áreas candidatas).

g) Análisis de sensibilidad: Se usó el método de Sobol basado en el cálculo de las varianzas (Sobol, 1990) para obtener K mapas de índices de sensibilidad de primer orden (S-maps) y K mapas de índices de sensibilidad total (ST-maps). El índice de sensibilidad de primer orden (S), representa la contribución de un peso de criterio (w_i) a la varianza total de la capacidad de acogida para el uso evaluado de un pixel y el índice de sensibilidad total (ST) da cuenta de la contribución total de un peso dado incluyendo sus interacciones con otros pesos. Por definición $ST_i \geq S_i$, si $ST_i = S_i$, w_i no participa en interacciones con otro peso. Las diferencias $ST_i - S_i$ y $1 - \sum_i S_i$ son una medida de la participación de w_i en las interacciones con otros pesos. Si $ST_i = 0$ significa que el modelo no es sensible a este peso. La suma de todos los S_i es igual a 1 cuando el modelo es aditivo y menor de 1 si es no aditivo. La suma de los ST_i es mayor que 1 para modelos no aditivos e igual a 1 solo en el caso de modelos aditivos (Saltelli et al., 2008).

h) Análisis de los resultados y conclusiones: Para analizar los resultados, se mapearon la aptitud promedio y su desvío estándar. Posteriormente se combinaron ambos resultados para particionarlos en las cuatro categorías de la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Categorización de regiones de aptitud en base a umbrales de aptitud media y desvío estándar. Cuadrante I (áreas robustas) y Cuadrante II (áreas candidatas)

	Desvío estándar bajo ($\leq 10\%$)	Desvío estándar alto ($> 10\%$)
Alta aptitud media ($\geq 60\%$)	Áreas prioritarias de alta confianza (áreas robustas)	Áreas prioritarias de baja confianza (áreas candidatas)
Baja aptitud media ($< 60\%$)	Áreas no prioritarias de alta confianza	Áreas no prioritarias de baja confianza

Para cada uso de suelo evaluado, se graficaron los índices de sensibilidad de primer orden y de sensibilidad total para mostrar comparativamente cuales son los pesos que más contribuyen a la variabilidad de los resultados del modelo. Los K mapas de índices de sensibilidad de primer orden (S-maps) y K mapas de índices de sensibilidad total (ST-maps) fueron incorporados a la base de datos geográfica generada en el marco de este trabajo.

El análisis de sensibilidad e incertidumbre se realizó mediante un script desarrollado en el lenguaje R que toma como entrada las imágenes raster de los K criterios estandarizados definidos en el capítulo III para evaluar la capacidad de acogida para cada uso, genera dos listas de $n=20.000$ muestras de pesos, a partir de las cuales por combinación se genera R muestras de pesos, donde $R = n * (K+2)$ a través de simulación de Monte Carlo utilizando el método de Sobol. El algoritmo calcula R valores de aptitud, a partir de los cuales deriva para cada uso: i) mapa de aptitud promedio, ii) mapa de incertidumbre (desvío estándar de la aptitud media), iii) K mapas de índices de sensibilidad de primer orden y iv) K mapas de índice de sensibilidad total.

4.4. Resultados

Los resultados se agrupan en dos apartados: 1) Cuantificación de la variación de los resultados a partir de los cambios de definición de los modelos y 2) Análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito.

4.4.1. Cuantificación de la variación de los resultados a partir de los cambios de definición de los modelos.

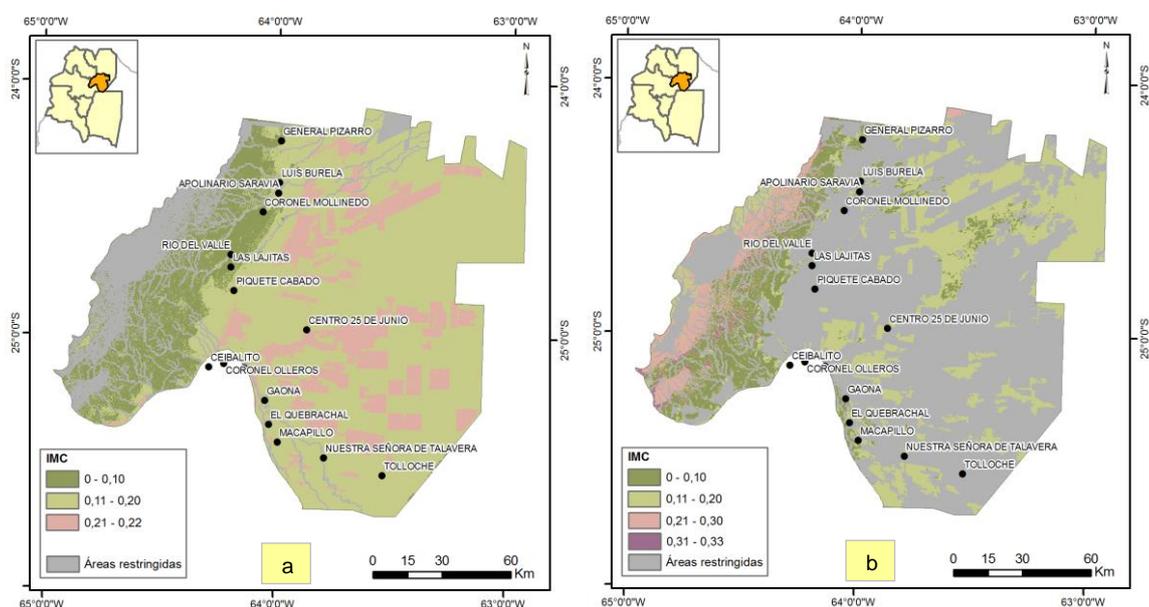
Los resultados se agrupan según el componente del modelo sujeto a modificación: a) diferentes perspectivas de los decisores (ponderaciones), b) cantidad de criterios considerados y c) los métodos de evaluación utilizados.

a) Resultados obtenidos a partir de la utilización de diferentes perspectivas de los decisores (ponderaciones): Como resultado de la ejecución de los modelos de CAU utilizando diferentes ponderaciones, se obtuvieron los coeficientes Kappa (Tabla 4.6) que representan la concordancia entre los niveles de aptitud obtenidos a partir de las ponderaciones de los Decisores D1, D2, D3 y D4 con respecto a los niveles de aptitud de los mapas de referencia (Figura 3.9 a 3.13). Por ejemplo, para el uso agrícola, los niveles de concordancia (Tabla 4.1) de D1 (tomado como referencia) con respecto a D2, D3 es pobre y leve, con D4 es moderada. Cabe señalar que las formaciones disciplinarias de los decisores son variadas y claramente influyen en la elección de las ponderaciones.

Tabla 4.6. Coeficientes Kappa calculados a partir de los mapas de niveles de aptitud obtenidos de la utilización de ponderaciones de diferentes decisores con respecto al mapa de nivel de aptitud tomado como referencia. R significa que las ponderaciones del decisor fueron tomadas como referencia.

Nivel de aptitud	Agricultura	Ap. Forestal del bosque nativo	Ecoturismo	Conservación	Ganadería
D1	R	0.4	0,0	0,0	0,1
D2	0,0	R	0,9	0,8	0,5
D3	0,1	0,0	R	R	0,0
D4	0,6	0.6	0,6	0,9	R

Los mapas de incertidumbre media cuadrática (IMC) para cada uso de suelo muestran un valor para cada píxel que expresa la diferencia media de los 3 mapas de capacidad de acogida con respecto al mapa tomado como referencia (Figura 4.6)



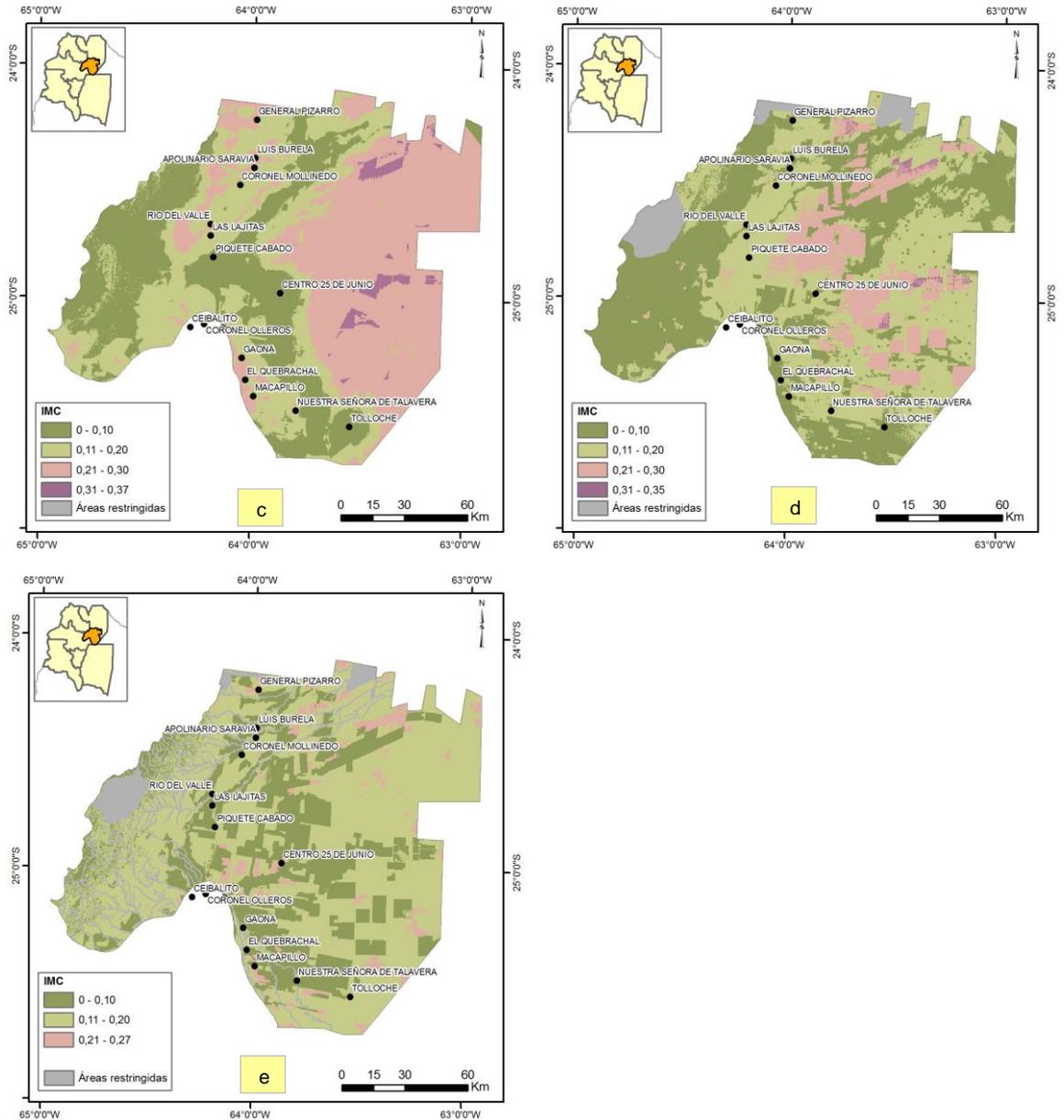
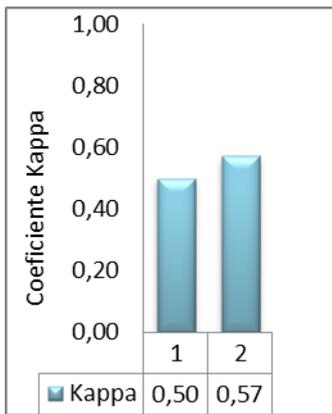
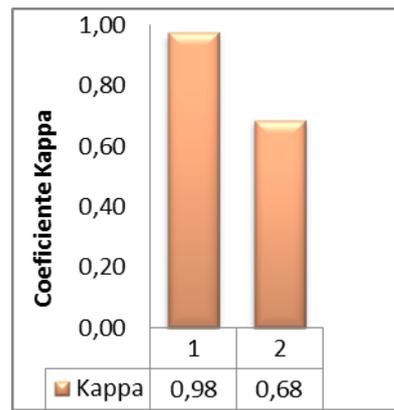


Figura 4.6. Mapas de incertidumbre media cuadrática (IMC) derivados de la utilización de diferentes ponderaciones para cada uso de suelo: a) agricultura, b) aprovechamiento forestal del bosque nativo, c) ecoturismo d) conservación y e) ganadería.

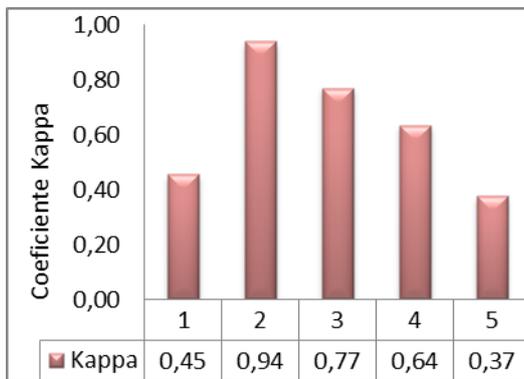
b) Resultados obtenidos a partir de la variación de la cantidad de criterios considerados: La Figura 4.7 muestra los gráficos de barras de los coeficientes Kappa obtenidos de la comparación de los mapas de referencia con los mapas capacidad de acogida para los usos resultantes de la extracción sucesiva de los criterios de menor importancia según sus valores de pesos (Tablas 3.19 a 3.23). En el caso del modelo de CAU agrícola se extrajeron en la primera corrida F2 (cobertura del suelo, $w_2 = 0,06$) y se obtuvo un coeficiente Kappa de 0,50. En la segunda corrida se extrajo F2 y F4 (disponibilidad de riego, $w_4 = 0,06$) y se obtuvo un coeficiente Kappa de 0,57.



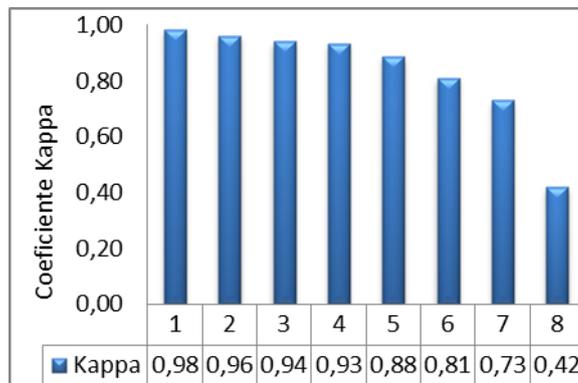
a) agricultura



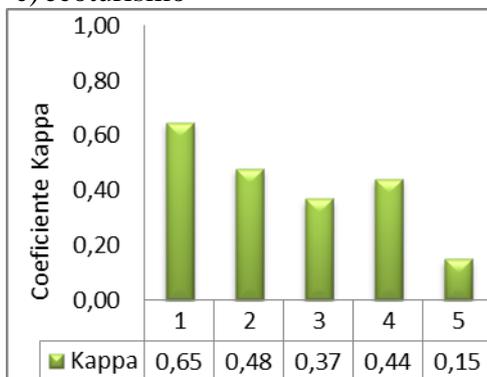
b) aprovechamiento forestal del bosque nativo



c) ecoturismo



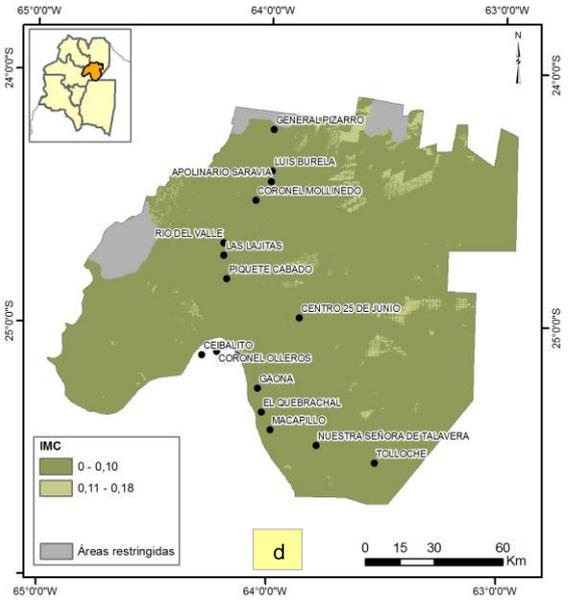
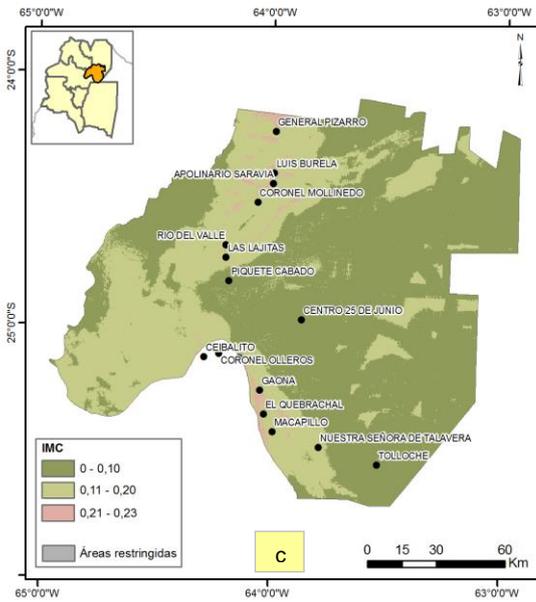
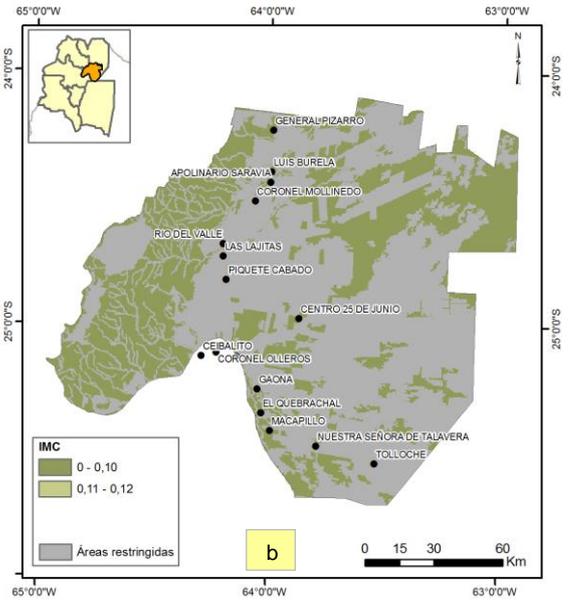
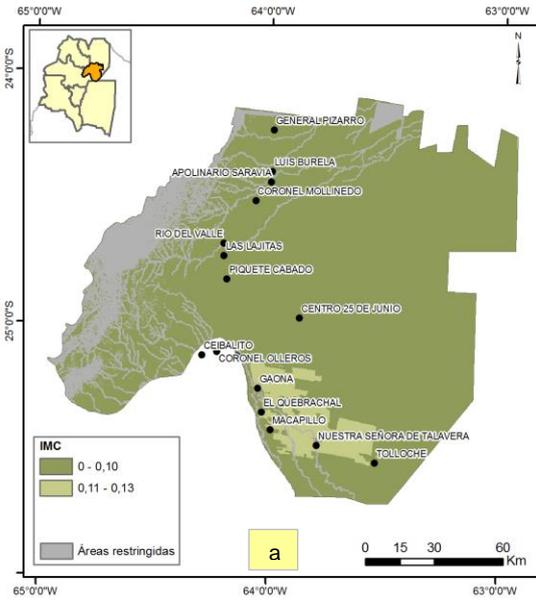
d) conservación



e) ganadería

Figura 4.7. Coeficientes Kappa calculados a partir de los mapas de niveles de aptitud obtenidos de la extracción de criterios con respecto al mapa de nivel de aptitud tomado como referencia.

Los mapas de incertidumbre media cuadrática (IMC) para cada uso de suelo muestran un valor para cada píxel que expresa la diferencia media de los mapas de capacidad de acogida resultantes de la extracción sucesiva de criterios con respecto al mapa tomado como referencia (Figura 4.8)



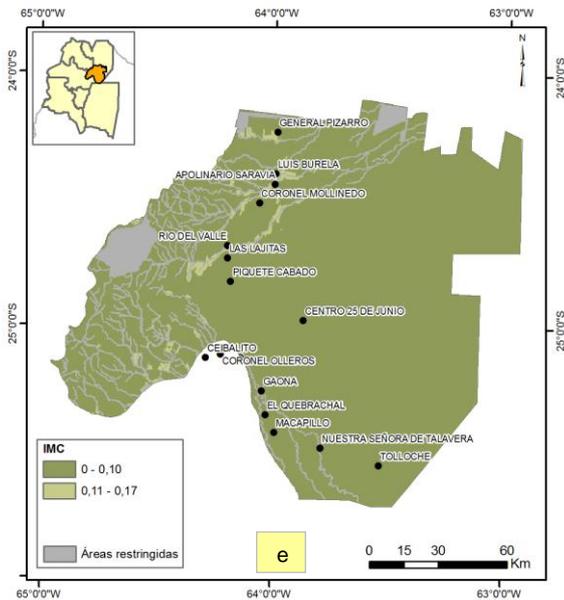
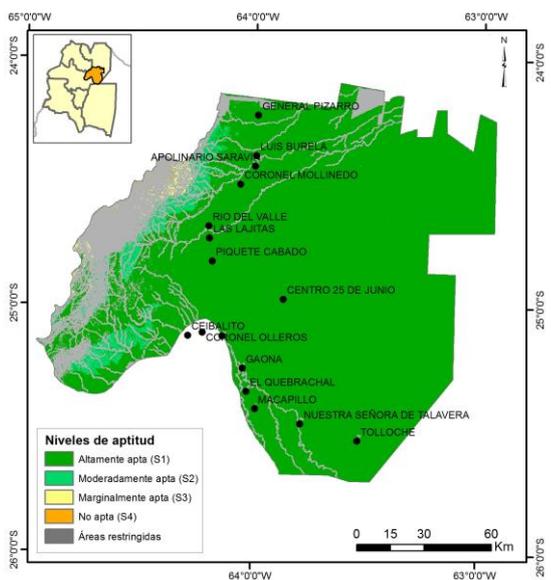
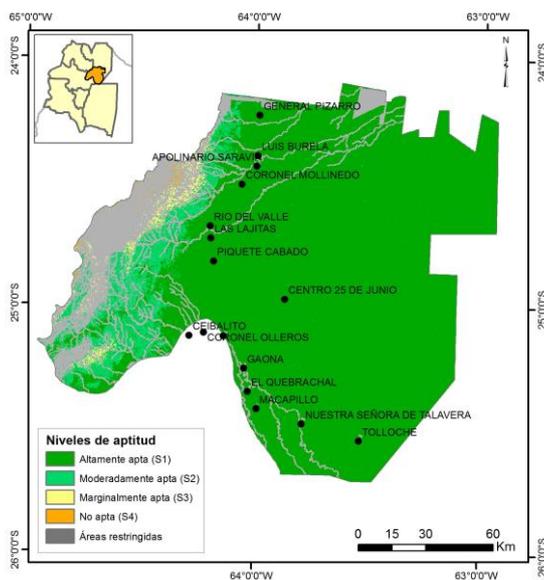


Figura 4.8. Mapas de incertidumbre media cuadrática (IMC) derivados de la extracción de criterios para cada uso de suelo: a) agricultura, b) aprovechamiento forestal del bosque nativo, c) ecoturismo d) conservación y e) ganadería.

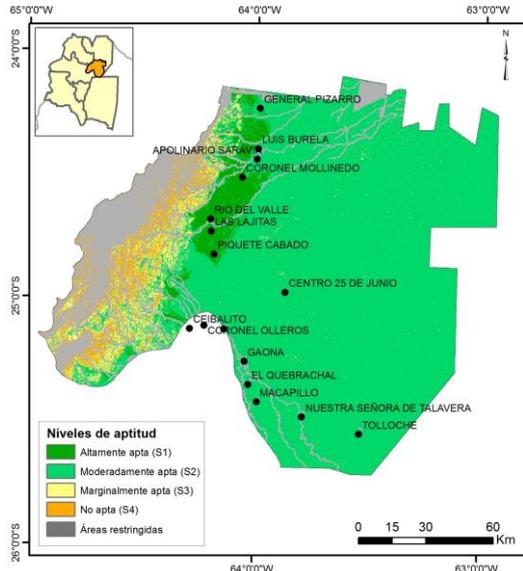
c) Resultados obtenidos a partir de la variación de los métodos de evaluación utilizados: La Figura 4.9 muestra los mapas de niveles de aptitud obtenidos con diferentes valores de ORNess (o parámetros α) para derivar una variedad de estrategias de decisión para los diferentes usos desde una estrategia extremadamente optimista hasta una estrategia extremadamente pesimista. La Figura 4.10 (a, b, c, d, e) muestra los gráficos de barras con las superficies (%) de los niveles de aptitud para cada uso.



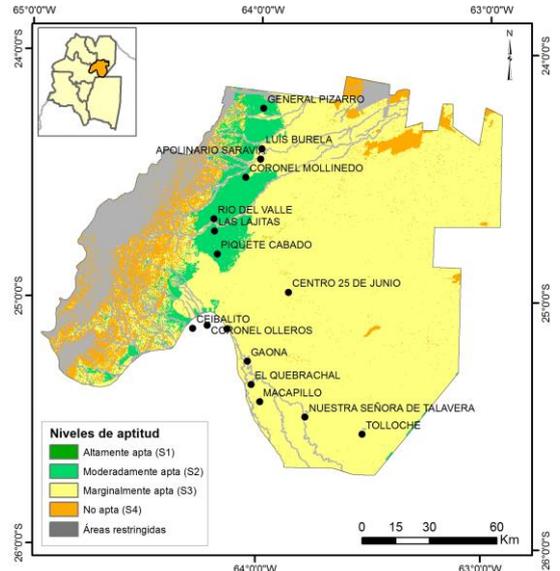
A- ED extremadamente optimista



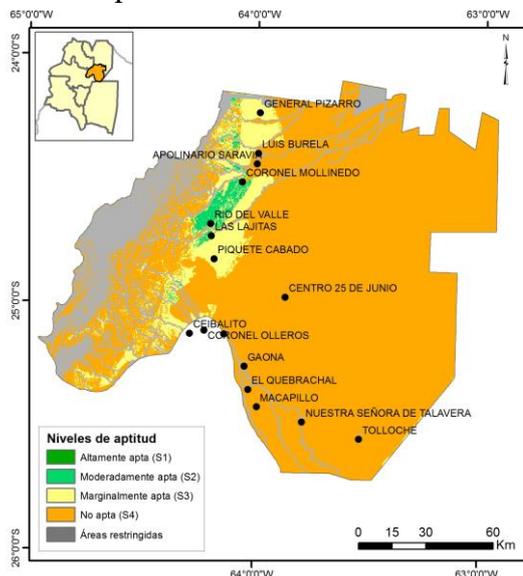
A- ED muy optimista



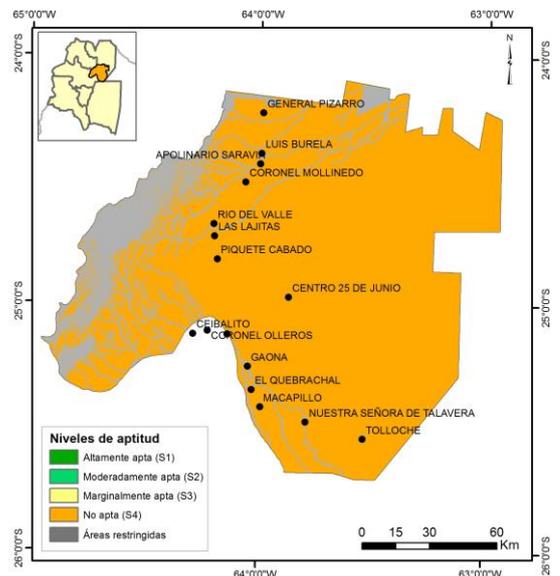
A- ED optimista



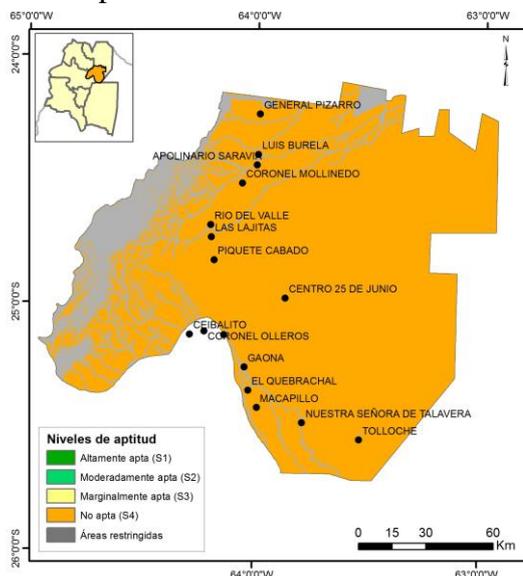
A- ED neutral



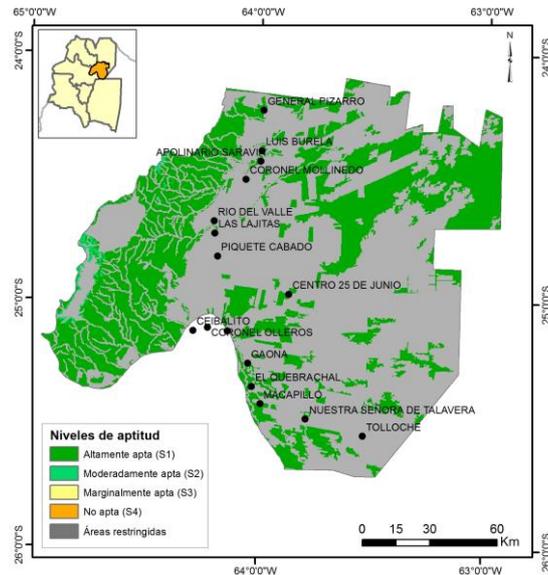
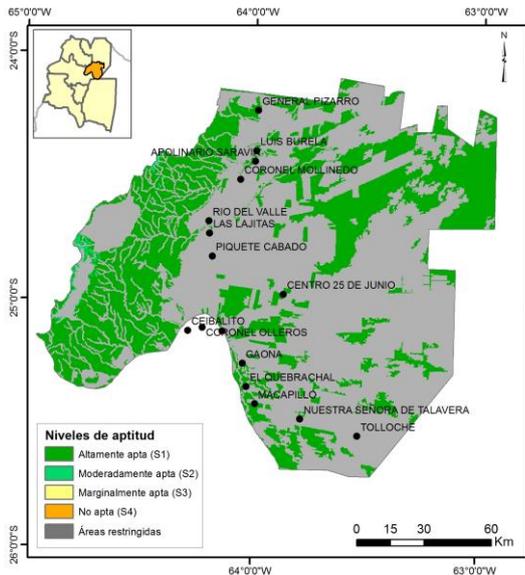
A- ED pesimista



A- ED muy pesimista

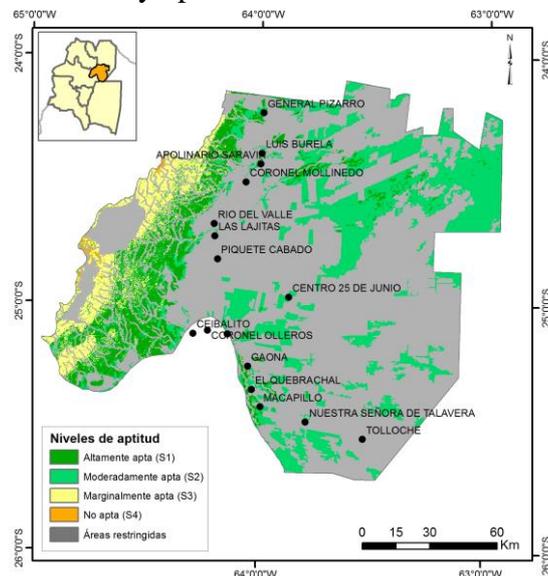
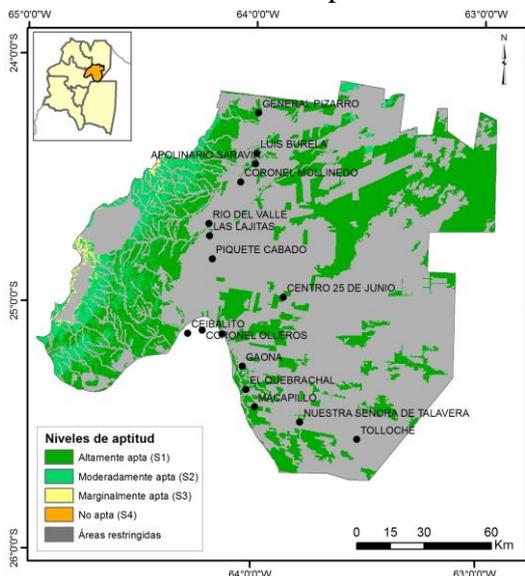


A- ED extremadamente pesimista



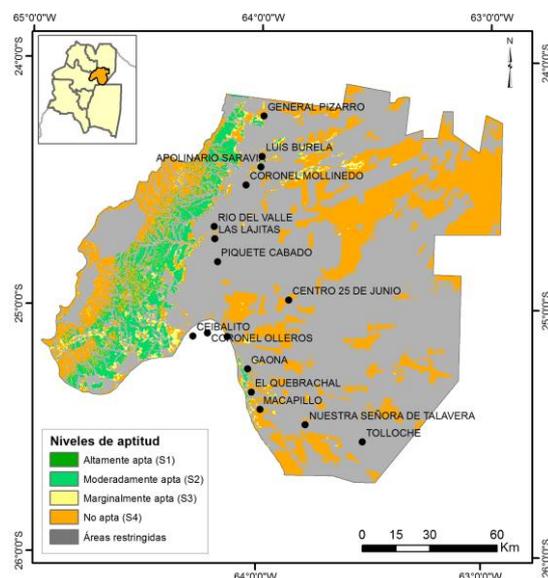
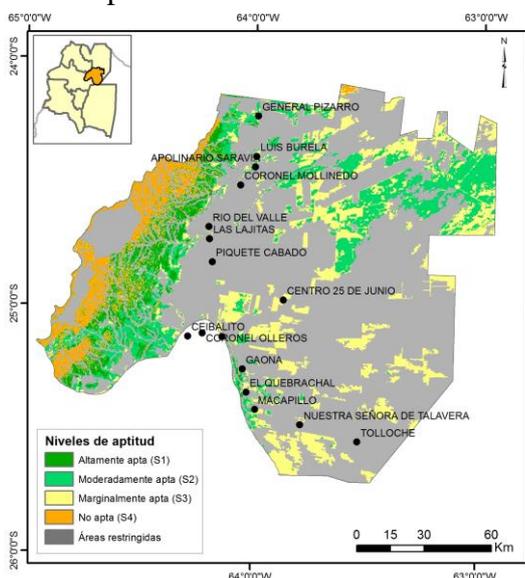
F- ED extremadamente optimista

F- ED muy optimista



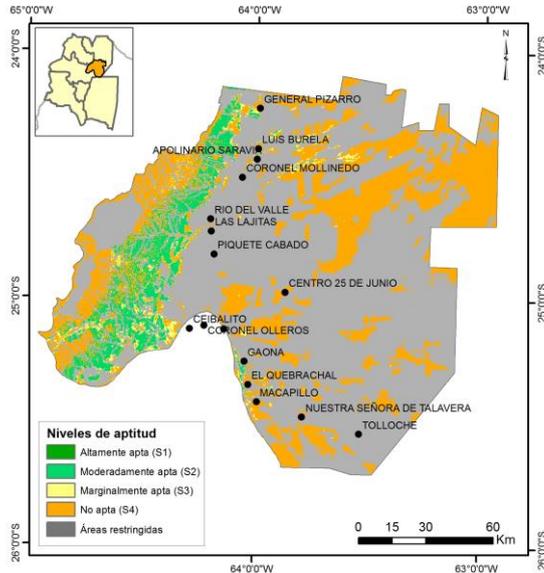
F- ED optimista

F- ED neutral

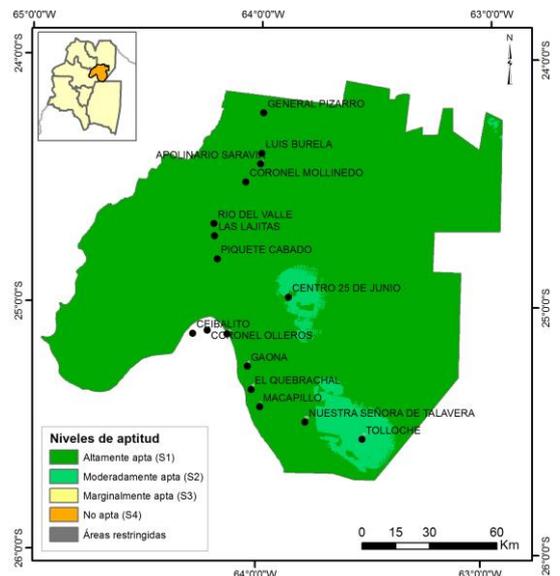
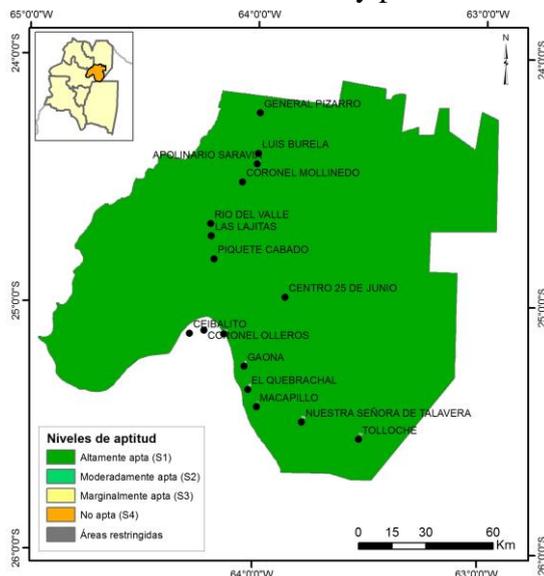


F- ED pesimista

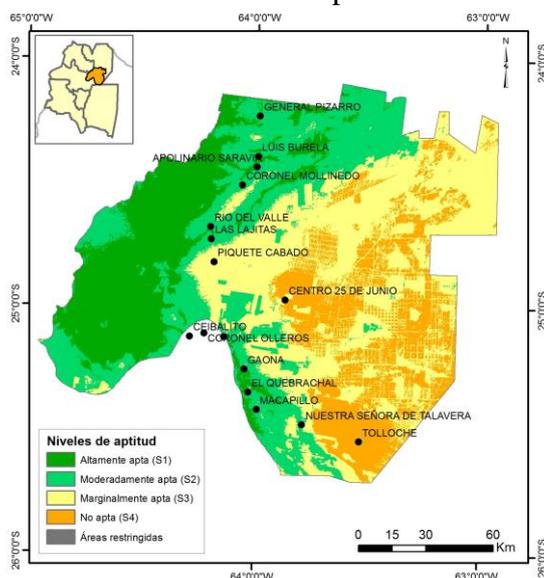
F- ED muy pesimista



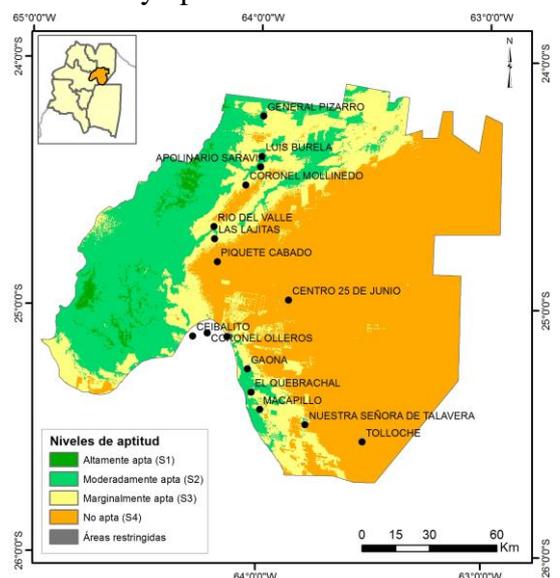
F- ED extremadamente muy pesimista



E- ED extremadamente optimista

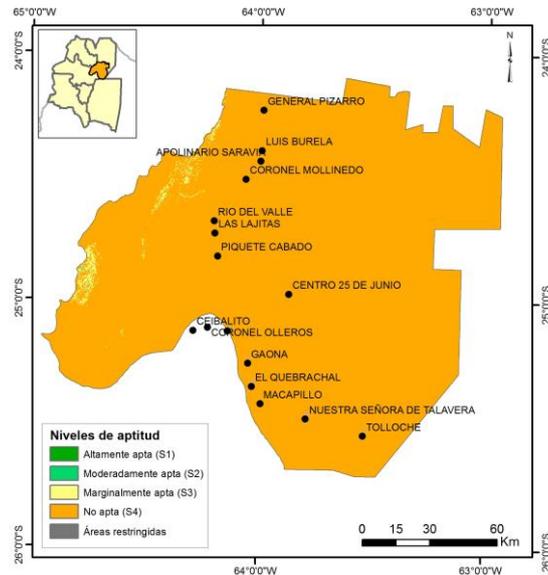
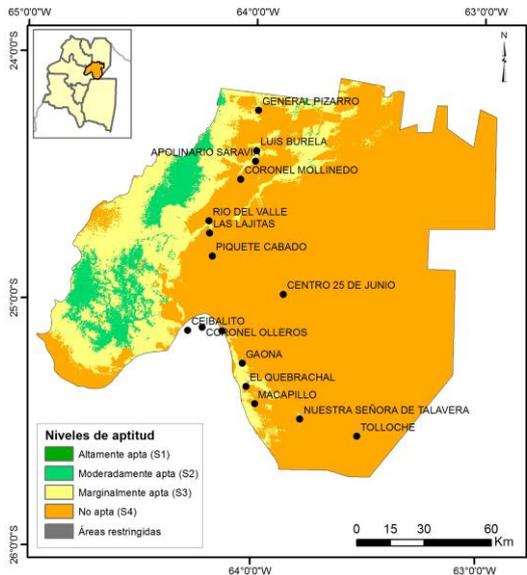


E- ED muy optimista



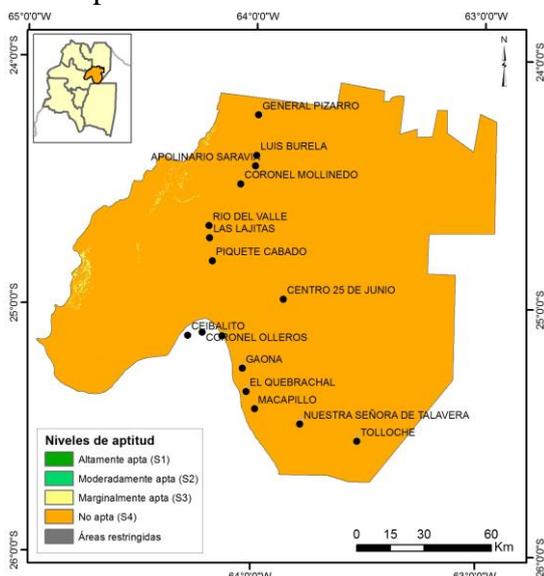
E- ED optimista

E- ED neutral

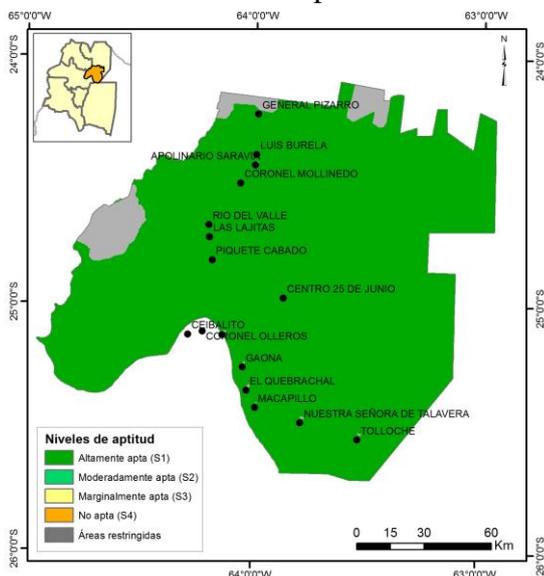


E- ED pesimista

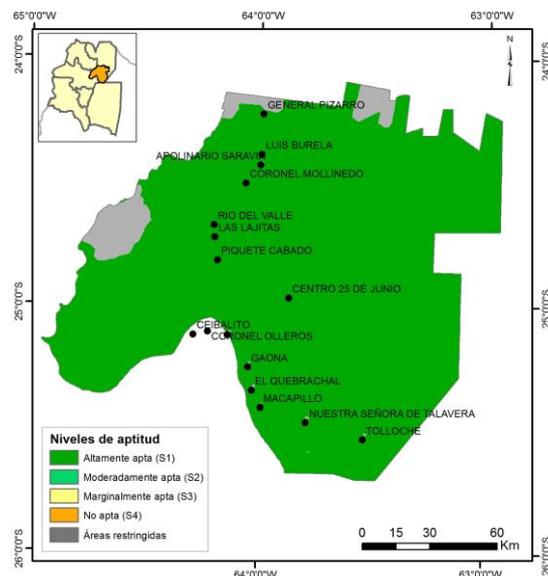
E- ED muy pesimista



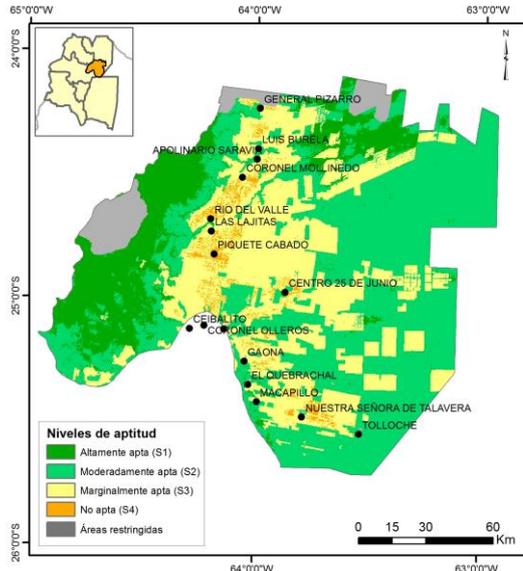
E- ED extremadamente pesimista



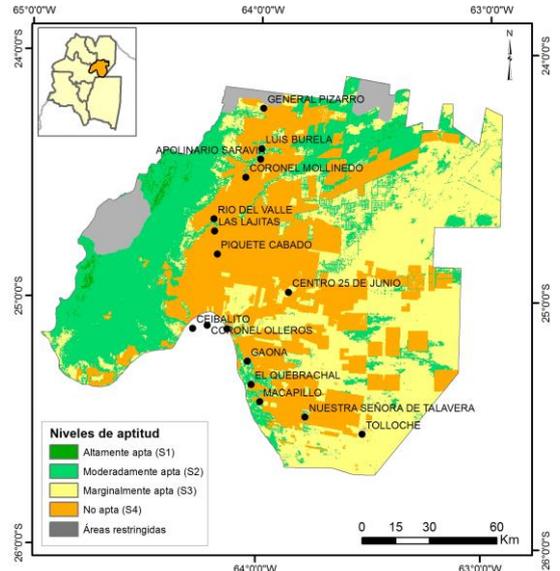
C- ED extremadamente optimista



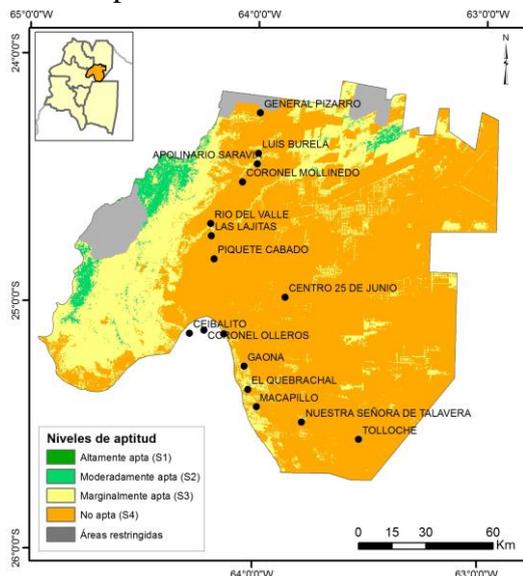
C- ED muy optimista



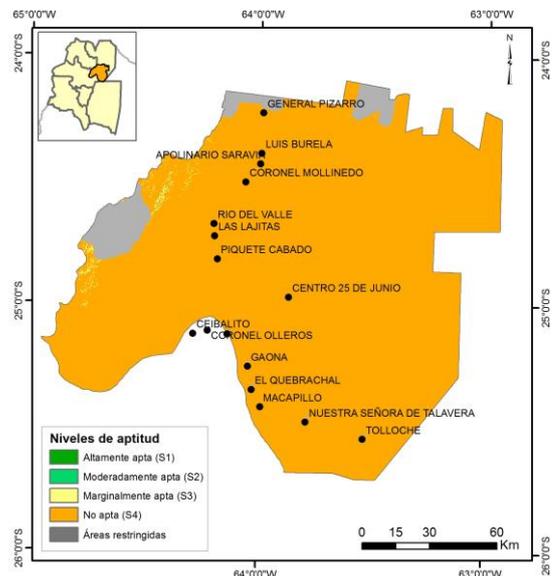
C- ED optimista



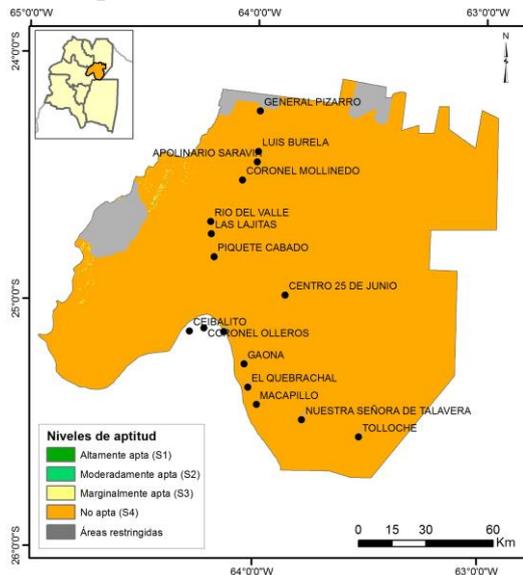
C- ED neutral



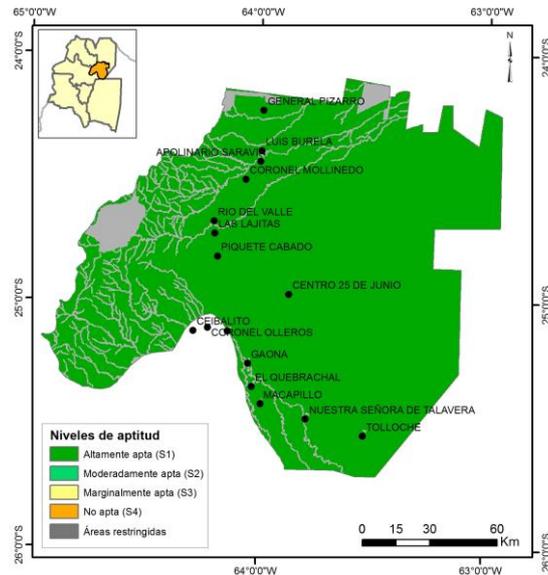
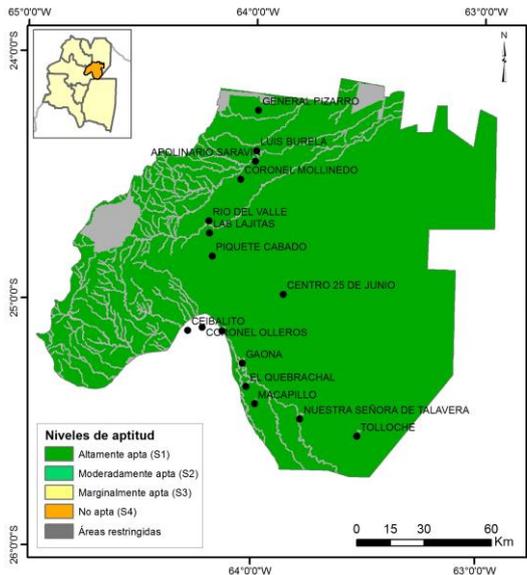
C- ED pesimista



C- ED muy pesimista

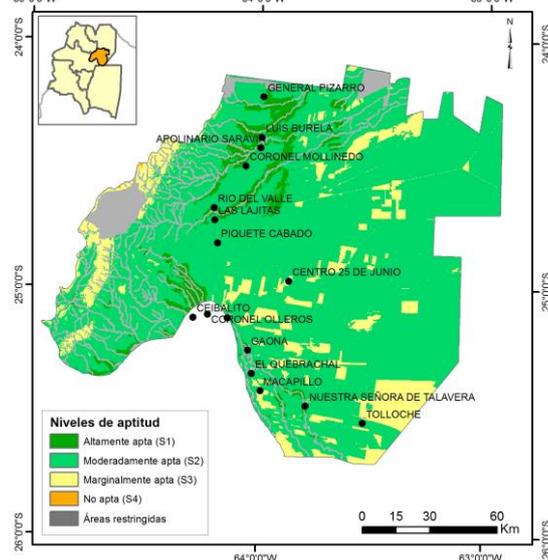
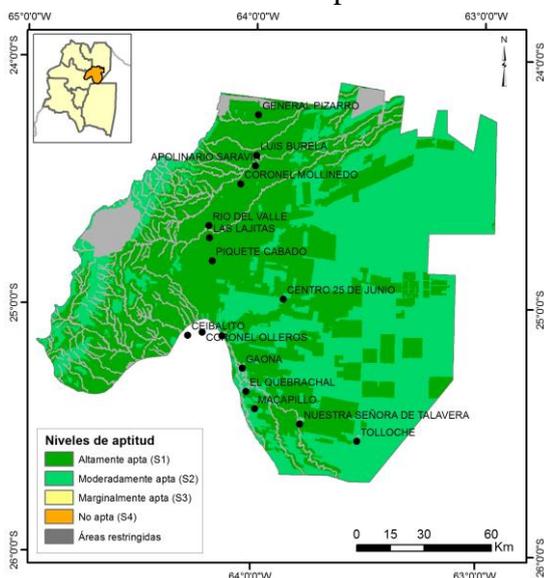


C- ED extremadamente pesimista



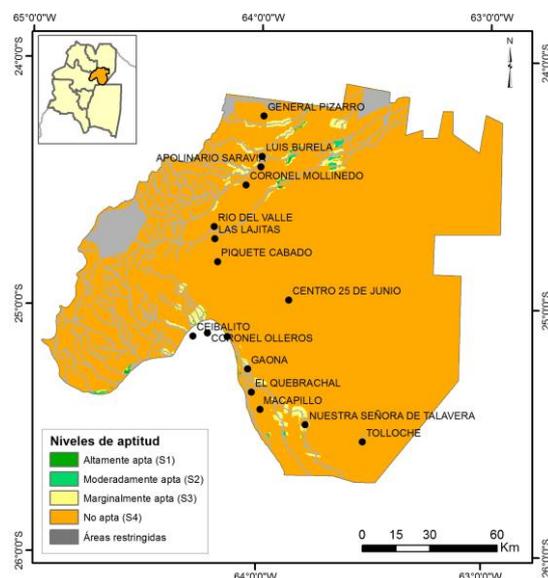
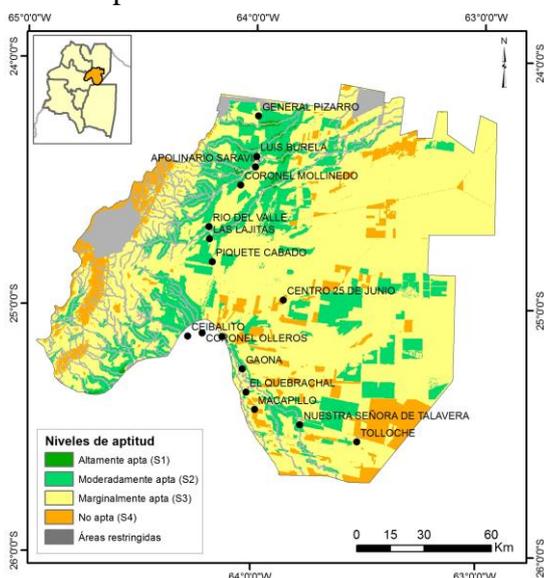
G- ED extremadamente optimista

G- ED muy optimista



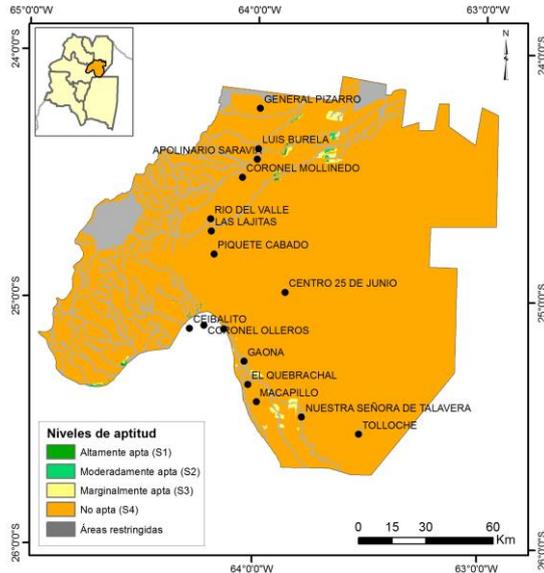
G- ED optimista

G- ED neutral



G- ED pesimista

G- ED muy pesimista



G- ED extremadamente pesimista

Figura 4.9. Mapas de niveles de aptitud obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación, ED significa estrategia de decisión, A - agricultura, F - aprovechamiento forestal del bosque nativo, E - ecoturismo, C – conservación, G- ganadería.

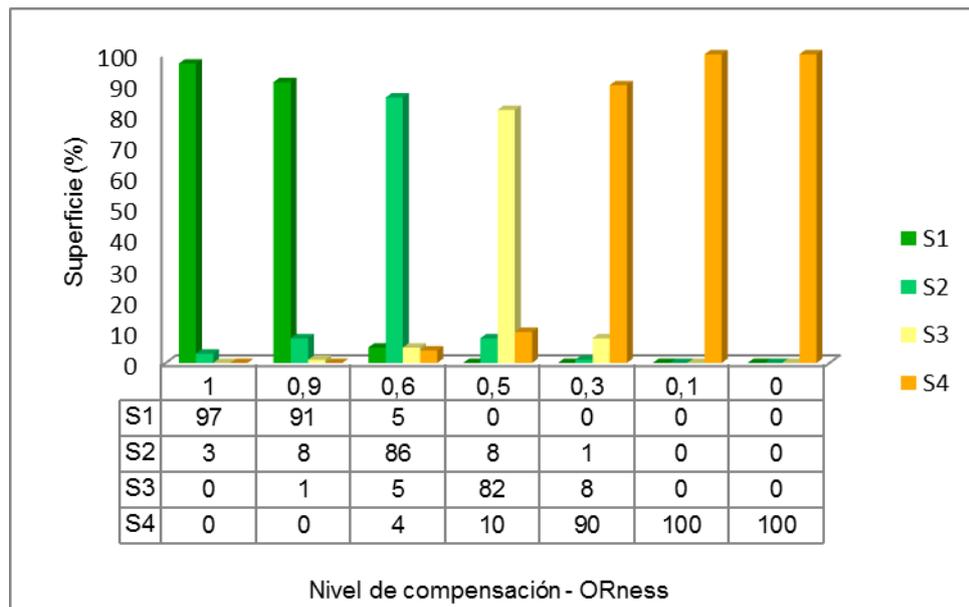


Figura 4.10.a. Superficies de niveles de aptitud (%) para uso agrícola obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORness). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.

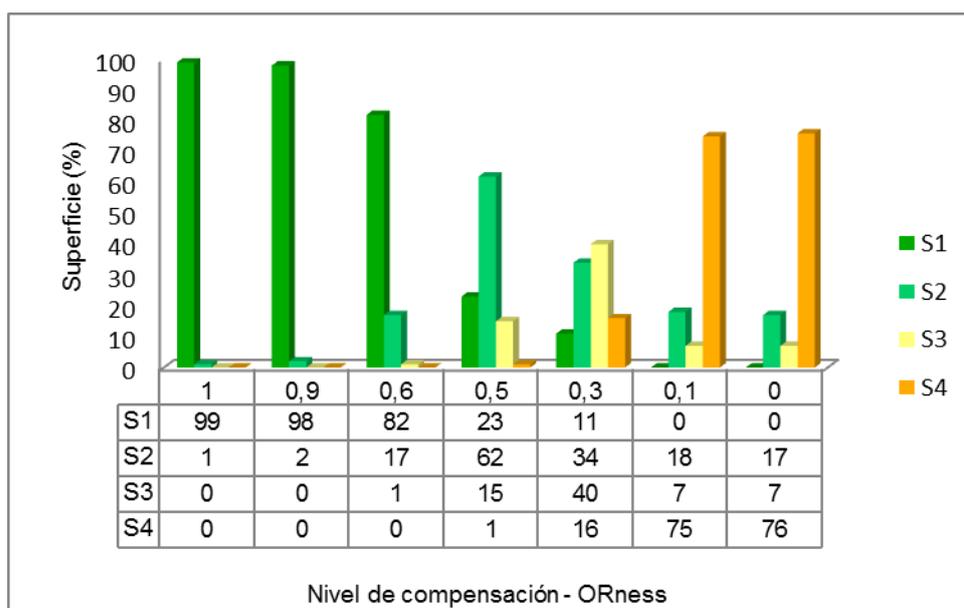


Figura 4.10.b. Superficies de niveles de aptitud (%) para aprovechamiento forestal del bosque nativo obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORNess). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.

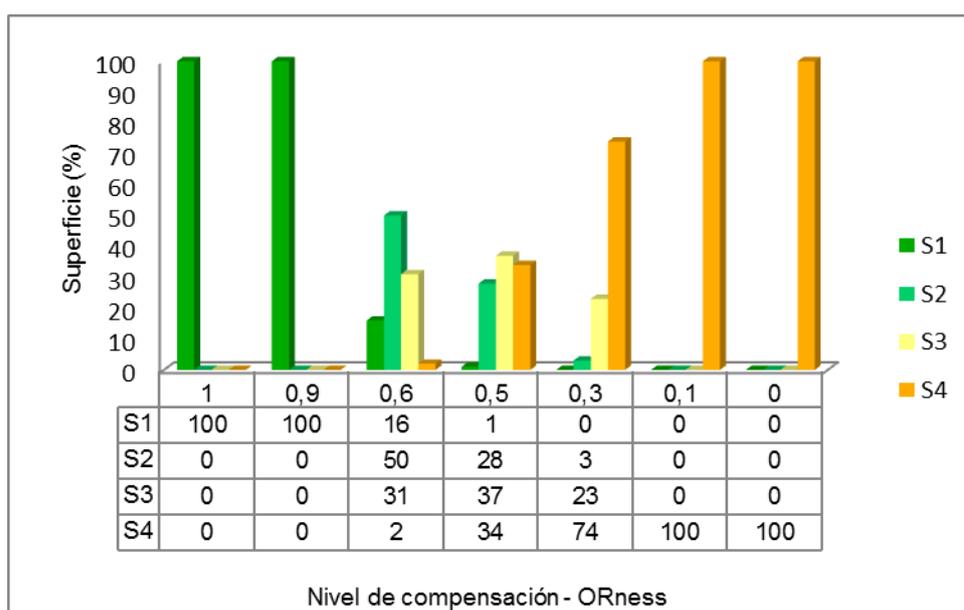


Figura 4.10.c. Superficies de niveles de aptitud (%) para conservación obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORNess). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.

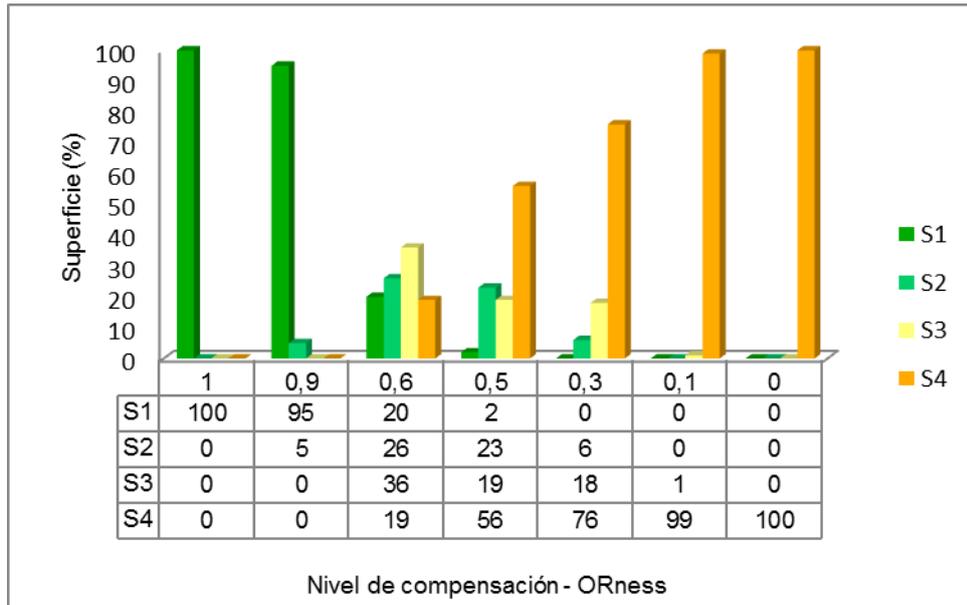


Figura 4.10.d. Superficies de niveles de aptitud (%) para ecoturismo obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORness). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.

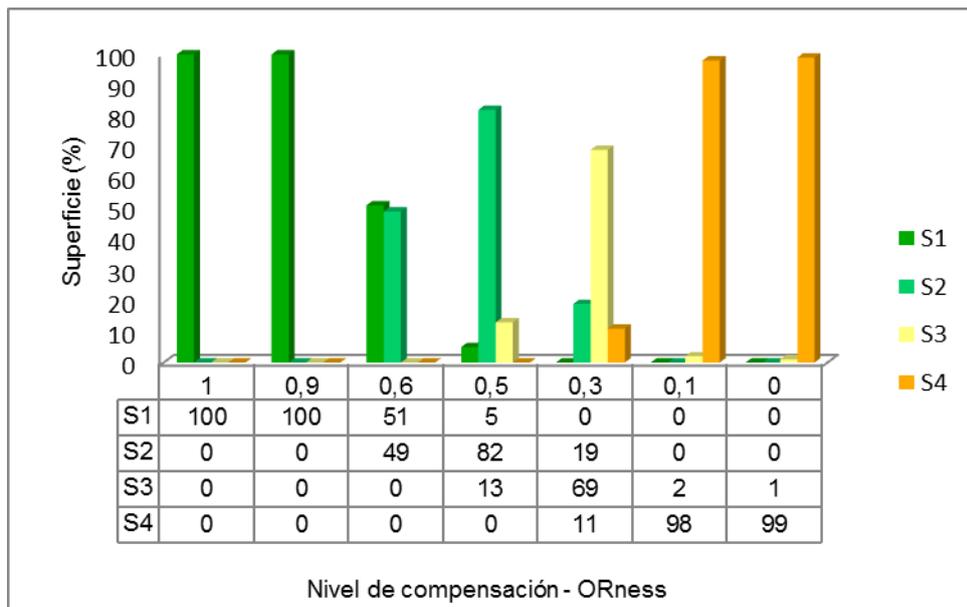
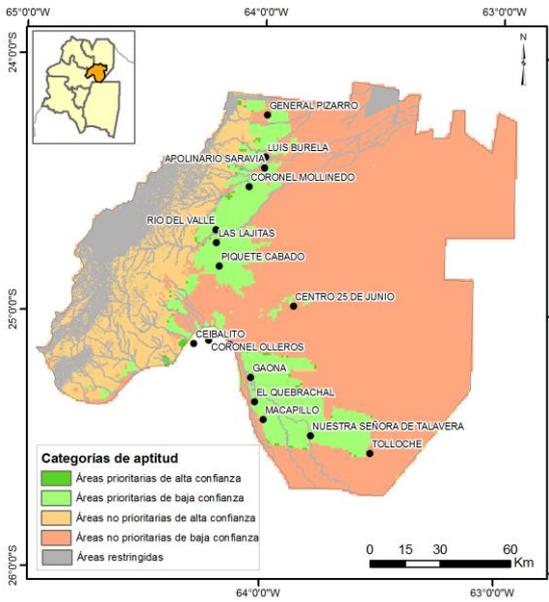


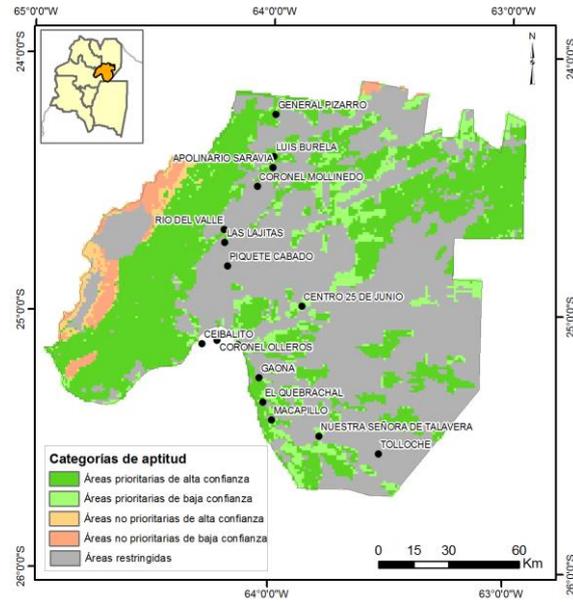
Figura 4.10.e. Superficies de niveles de aptitud (%) para ganadería obtenidos a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación (valores de ORness). S1 significa altamente aptas; S2, moderadamente aptas; S3, marginalmente aptas; N, no aptas.

4.4.2. Aplicación de un método de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito.

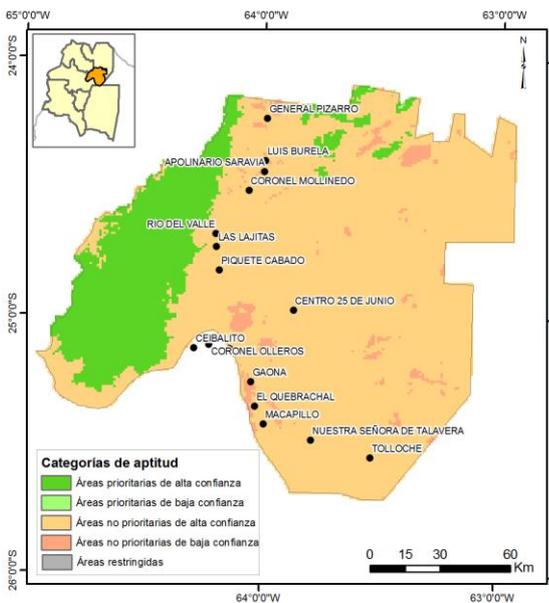
La Figura 4.11 muestra los mapas de categorización de regiones de aptitud en base a umbrales de aptitud media y desvío estándar para los usos de suelos evaluados.



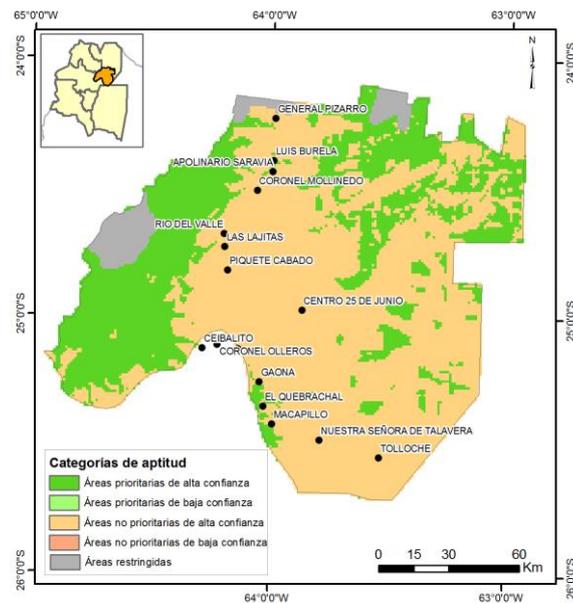
a) Agricultura



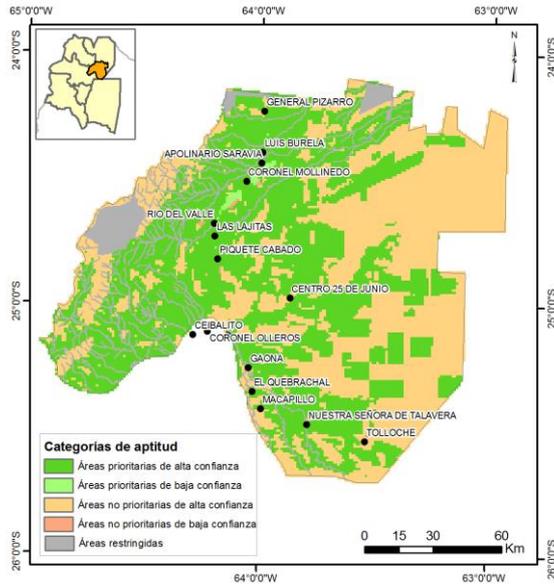
b) Aprovechamiento forestal del bosque nativo



c) Ecoturismo



d) Conservación



e) Ganadería

Figura 4.11. Categorización de regiones de aptitud en base a umbrales de aptitud media y desvío estándar.

Las Figuras 4.12.a a la 4.12.e muestran los diagramas de cajas o boxplot de los índices de sensibilidad de primer orden e índices de efecto total asociados a los pesos para los modelos de acogida para distintos usos.

El índice de sensibilidad de primer orden (S), representa la contribución de un peso de criterio (w_i) a la varianza total de la capacidad de acogida para el uso evaluado de un pixel y el índice de sensibilidad total (ST) da cuenta de la contribución total de un peso dado incluyendo sus interacciones con otros pesos.

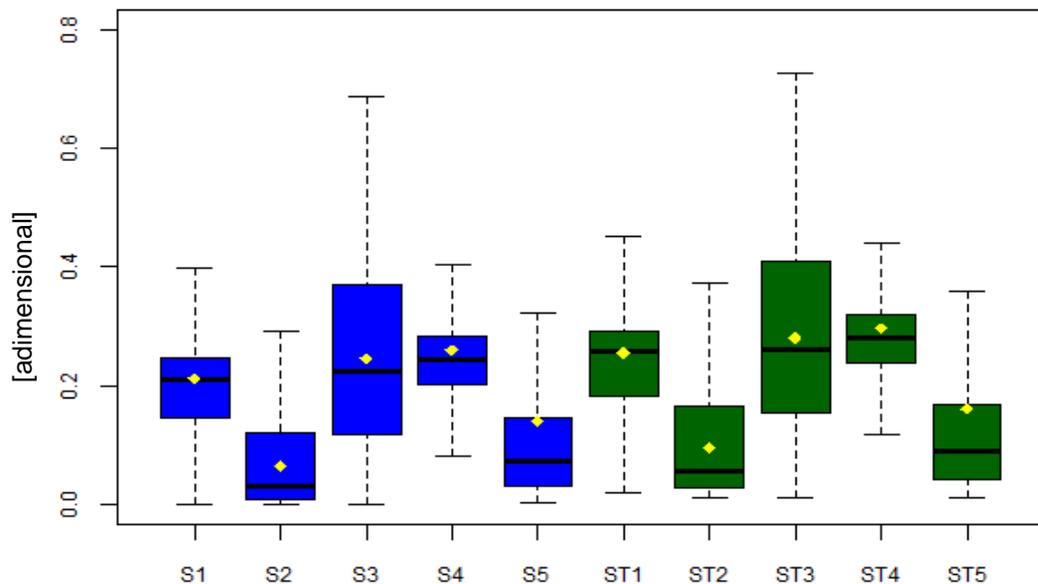


Figura 4.12.a. Índices de primer orden ($S1$ a $S5$) e índices de efecto total ($ST1$ a $ST5$) para el uso agrícola. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.

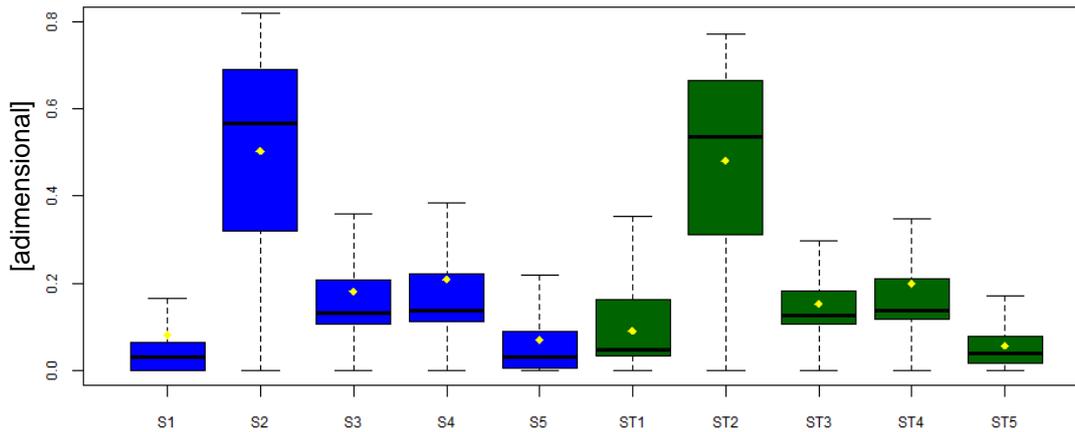


Figura 4.12.b. Índices de primer orden (S1 a S5) e índices de efecto total (ST1 a ST5) para aprovechamiento forestal del bosque nativo. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.

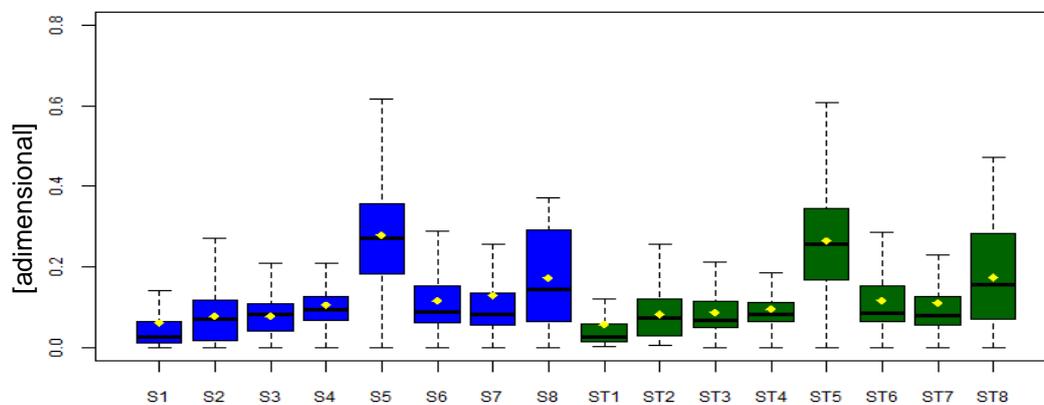


Figura 4.12.c. Índices de primer orden (S1 a S8) e índices de efecto total (ST1 a ST8) para ecoturismo. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.

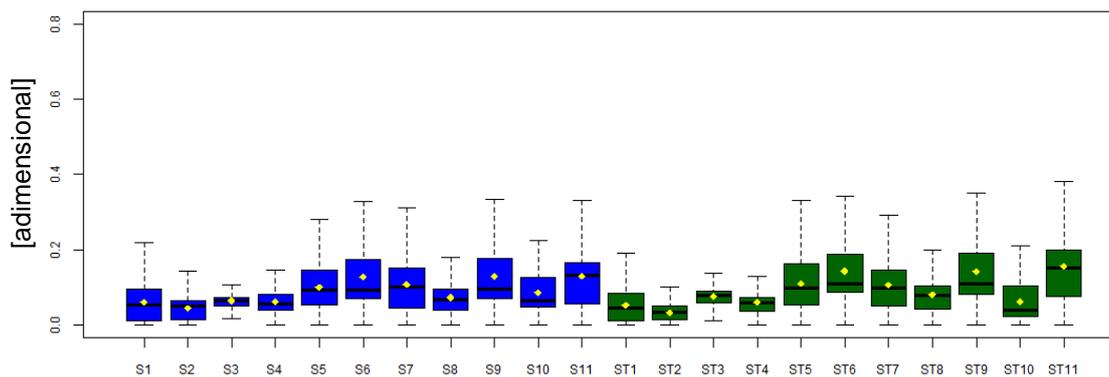


Figura 4.12.d. Índices de primer orden (S1 a S11) e índices de efecto total (ST1 a ST11) para conservación. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.

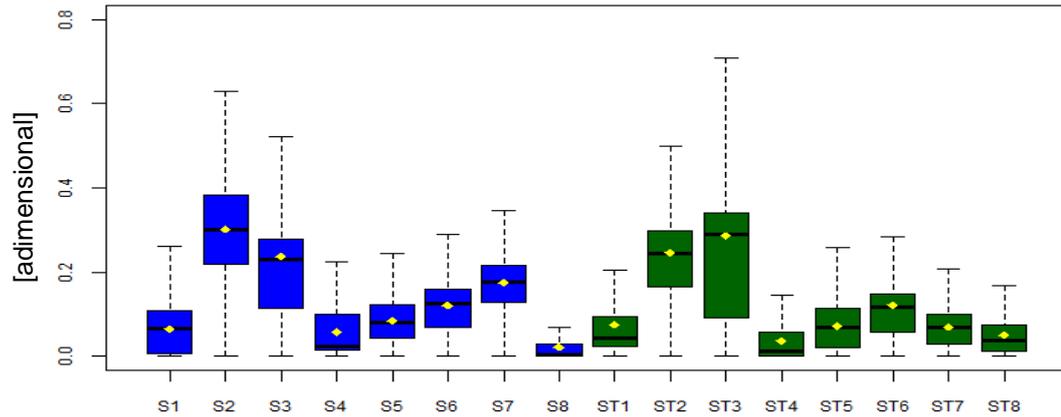


Figura 4.12.e. Índices de primer orden (S1 a S8) e índices de efecto total (ST1 a ST8) para ganadería. Los puntos amarillos representan las medias de los índices.

4.5. Conclusiones

La comparación de los resultados obtenidos para los diferentes usos de acuerdo a diferentes ponderaciones de criterios (Tabla 4.6) en un 75% de los casos arrojó coeficientes Kappa menores o iguales a 0,60 y solo en un 25% se obtuvieron concordancias considerables o casi perfectas. Estos resultados nuevamente ponen de manifiesto una de las principales carencias del método AHP, la subjetividad de los expertos a la hora de comparar la importancia de los criterios.

Con respecto a la variación de la cantidad de criterios, los coeficientes Kappa (Figura 4.7) muestran para algunos usos que la variación no es proporcional a la cantidad de criterios que se extrajeron, ni a sus valores de pesos, por lo cual se deduce que responde a los valores de los criterios. Para hacer un análisis completo de cada modelo, se podrían probar todas las posibles formas de extraer criterios, generando modelos simplificados que produzcan resultados similares.

Por su parte los mapas IMC, muestran en valor absoluto las diferencias pixel a pixel entre las puntuaciones de los resultados de los modelos “simulados” con respecto a los valores de aptitud tomados como referencia. El rango de variación de los modelos “simulados” a partir de diferentes ponderaciones para todos los usos fue considerablemente superior al rango de variación de los modelos “simulados” a partir de la variación de la cantidad de criterios considerados, por lo tanto concluyo que los modelos de capacidad de acogida fueron más sensibles a las ponderaciones que a la cantidad de criterios considerados.

La generalización del método OWA a través de la implementación de diferentes estrategias de combinación genera diferentes mapas de aptitud (Figuras 4.9) variando un único parámetro (el valor de ORNess que varía entre 0 y 1). Los mapas resultantes dan opciones de riesgo que van desde una posición extremadamente optimista a una extremadamente pesimista, pasando por todos los tipos intermedios. El resultado más importante de esta evaluación es poder mostrar a través de mapas diferentes opciones y que los decisores, sobre esta base, sean los que decidan el riesgo que están dispuestos a asumir en el momento de llevar a cabo tareas de planificación. Asimismo los gráficos de la Figura 4.10 muestran las superficies (%) de los niveles de aptitud para cada uso, observándose claramente como disminuyen las superficies de las clases de mayor aptitud e incrementan las superficies de las categorías de menor aptitud, a medida que se

disminuye el nivel de compensación permitido (desde una estrategia extremadamente optimista a una estrategia extremadamente pesimista)

Debido a la reducida concordancia entre los resultados obtenidos a partir de diferentes ponderaciones, se justifica la utilización del método de análisis de sensibilidad e incertidumbre como una función de los pesos usando simulación de Monte Carlo y análisis de sensibilidad global para identificar alternativas de decisión de alta confianza.

El análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito permite diferenciar a partir de un gran número de combinaciones de pesos muestreadas, áreas robustas (las áreas de alta aptitud y baja incertidumbre) y áreas candidatas (las áreas de alta aptitud y alta incertidumbre), información que permite asignar prioridades en el momento de la planificación.

La diferencia entre el índice de sensibilidad de primer orden y el índice de sensibilidad total para cada peso sometido a evaluación, en todos los casos fue menor a 0,2 por lo que podemos afirmar que la interacción entre los pesos es mínima (Gómez Delgado y Barredo Cano, 2005). En el caso de los modelos de capacidad de uso que consideran menor cantidad de criterios, se pueden apreciar más claramente las diferencias entre las medias de los índices de sensibilidad de primer orden, resultando visible los pesos que tienen mayor impacto sobre la variabilidad de los resultados. Debido a que la interacción entre los pesos es mínima, se observa una alta correlación (cercana a la igualdad) entre los S_i y ST_i .

Como conclusión del análisis de sensibilidad e incertidumbre podemos afirmar que los modelos son sensibles a los juicios de valor de los decisores al momento de comparar la importancia de los factores. Por otra parte, no hay una relación directa de la incertidumbre de los resultados con respecto a la cantidad de criterios que se extrajeron, y son extremadamente sensibles a las estrategias de decisión. Poder visualizar espacialmente las diferentes opciones y cuantificar las superficies asociadas a cada nivel de aptitud para cada una de las alternativas permite a los decisores elegir una solución compromiso en el momento de la planificación, conociendo los riesgos que se asumen.

4.6. Bibliografía

- Boroushaki, S. & J. Malczewski. 2008. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. *Comput. Geosci.* 34 (4): 399–410.
- Bunruamkaew, K. & Y. Murayama. 2011. Site Suitability Evaluation for Ecotourism Using GIS & AHP: A Case Study of Surat Thani Province, Thailand. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 21(0): 269-278.
- Burgman, M. 2005. Risks and decisions for conservation and environmental management. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Chen, Y., J. Yu & S. Khan. 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software* 25: 1582-1591.
- Chen, Y. & Z. Paydar. 2012. Evaluation of potential irrigation expansion using a spatial fuzzy multi-criteria decision framework. *Environmental Modelling & Software* 38, 147-157.
- Cohen J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Meas* 20:37-46.
- Daniel, C. 1958. 131 Note: on varying one factor at a time. *Biometrics* 14, 2.
- Eastman, J. 2003. IDRISI Kilimanjaro. Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs, Clark University, Worcester, Massachusetts.
- Feizizadeh, B., P. Jankowski & T. Blaschke. 2014. A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computers & Geosciences* 64(0): 81-95.
- Gómez Delgado, M. & J. Bosque Sendra. 2004. Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision making: a review. *Human and ecological risk assessment* 10(6): 1-15.
- Gómez Delgado, M. & J. Bosque Sendra. 2004b. Aplicación de análisis de incertidumbre como método de validación y control del riesgo en la toma de decisiones, *GeoFocus (Artículos)*, nº 4, p. 179-208. ISSN:1578-5157.
- Gómez Delgado, M & J. Barredo Cano. 2005. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2da edición. Editorial Alfaomega-Ra-Ma.
- Jankowski, P. 1995. Integrating geographical information-systems and multiple criteria decision-making methods. *Int J Geogr Inf Syst* 9(3):251–273.
- Jelokhani-Niaraki, M. & J. Malczewski. 2015. A group multicriteria spatial decision support system for parking site selection problem: A case study. *Land Use Policy* 42: 492-508.
- Landis J., G. Koch. 1977. The measurement of observer agreement for category data. *Biometrics* 33:159-174.

- Ligmann-Zielinska, A. & P. Jankowski. 2012. Impact of proximity-adjusted preferences on rank-order stability in geographical multicriteria decision analysis. *J. Geogr. Syst.* 14, 167–187.
- Ligmann-Zielinska, A. & P. Jankowski. 2014. Spatially-explicit integrated uncertainty and sensitivity analysis of criteria weights in multicriteria land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software* 57(0): 235-247.
- Malczewski, J., 1999. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *Int. J. Geogr. Inform. Sci.* 20: 703-726.
- Malczewski, J. 2006b. Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GISbased multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 8(4): 270–277.
- Pujol G., B. Looss, A. Janon. 2015. Sensitivity: sensitivity analysis. R package version, 1.10.1.
- Ravalico, J. , G. Dandy & H. Maier. 2010. Management Option Rank Equivalence (MORE). A new method of sensitivity analysis for decision-making. *Environmental Modelling & Software* 25(2): 171-181.
- Saaty, T. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structure. *J. Math. Psychol* 15 (3): 234–281.
- Saltelli, A., S. Tarantola & F. Campolongo. 2000. Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. *Stati. Sci.* 15: 377–395.
- Saltelli, A., S. Tarantola, F. Campolongo & M. Ratto. 2004. *Sensitivity Analysis in Practice. A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. England. 219 p.
- Saltelli, A., M. Ratto, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli , M. Saisana, & S. Tarantola. 2008. *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. England. 292 p.
- Saltelli, A., P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, & S. Tarantola. 2010. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Comm.* 181: 259-270.
- Sobol', I. 1990. On sensitivity estimation for nonlinear mathematical models. *Matematicheskoe Modelirovanie*: 112-118.
- Tenerelli, P.& S. Carver. 2012. Multi-criteria, multi-objective and uncertainty analysis for agro-energy spatial modeling. *Appl. Geogr* 32: 724–736.
- Xu, E. & H. Zhang. 2013. Spatially-explicit sensitivity analysis for land suitability evaluation. *Applied Geography* 45(0): 1-9.

- Yager, R. 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 18 (1), 183–190.
- Yager, R. 1997. On the inclusion of importances in OWA aggregations. In: Yager, R. & J. Kacprzyk (Eds.), *The Ordered Weighted Averaging Operators*. Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 41–59.

5. Conclusiones Generales

En el marco del proceso de planificación participativo, esta tesis apuntó a facilitar las actividades de sustento técnico que se deben realizar junto con las actividades de sustento social para contribuir al ordenamiento territorial rural de manera integrada. Para ello, se desarrolló un protocolo de trabajo “objetivo” y replicable fundamental para el OT a través de la integración de una serie de herramientas: técnicas de evaluación multicriterio, lógica difusa y sistemas de información geográfica, que permite procesar información de diferente procedencia y características para formular las propuestas de ordenamiento territorial. El protocolo de trabajo propuesto fue integrado en un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE).

En este capítulo final se resumen y discuten los principales aportes de esta tesis. Si bien cada capítulo individualmente presentó conclusiones parciales, aquí se plantea una revisión integral del proceso metodológico, los resultados obtenidos y la forma en que contribuye al proceso de ordenamiento territorial rural en la Argentina.

5.1. Acerca de la metodología

Se proponen las siguientes líneas de discusión:

- a) *Aportes de la tesis en relación al modelo de formulación y gestión de un plan de OT propuesto en la Guía metodológica de Ordenamiento Territorial en el Municipio desarrollada por FAO, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca y el INTA (Méndez Casariego y Pascale Medina, 2014)*

En relación al modelo propuesto en la Guía metodológica (Figura 5.1), esta tesis aporta a la etapa de diagnóstico, que incluye la recopilación, sistematización y análisis de la información necesaria para conocer y valorar las potencialidades y limitantes del territorio y la identificación de los procesos críticos que influyen en su funcionamiento actual. En el anexo, la Guía sugiere la utilización de SIG para generar productos básicos relacionados a los cuatro subsistemas principales: administrativo, biofísico, social y económico y luego, presenta por tema, sitios e instituciones en los que se puede encontrar información de los factores que inciden en la configuración del territorio. La contribución específica, desde este trabajo es la definición de las variables relacionadas a estos subsistemas y la utilización de herramientas de análisis espacial cuantitativo como el análisis multivariado, el análisis de encadenamiento y/o la superposición de capas para obtener las zonificaciones biofísicas, socioeconómicas y político-institucionales. Por otro lado, a través de la incorporación de estas herramientas en el SADE, se explicitan y facilitan los procesos de análisis y síntesis de la información.

En la etapa de Prospectiva, la Guía establece como un paso, la evaluación de aptitud de uso que posee cada unidad territorial para la localización y desarrollo de distintas actividades o usos del suelo. Sugiere utilizar EMC y como software propone la utilización de Expert Choice (software propietario) que está basado en el Proceso Jerárquico Analítico (AHP). La metodología propuesta en esta tesis, define factores y restricciones para cinco usos de suelos del NOA, aborda los procesos de estandarización de criterios, incorpora diferentes técnicas de EMC como la Combinación Lineal basada en el AHP y el Promedio Ponderado Ordenado, que a través de la variación de un parámetro permite recorrer el espacio de decisión en función del riesgo y la compensación asumidos. Se generaron además los mapas de

aptitud para usos individuales y para usos múltiples. El SADE integra todas las herramientas utilizadas en el proceso, como un plugin del software libre de SIG, QGIS. De este modo se facilita la ejecución iterativa, variando las funciones de estandarización (simples o a través de funciones de pertenencia difusas), las ponderaciones (de diferentes actores), y las técnicas. También se da la opción de crear reglas de decisión utilizando términos lingüísticos y lógica difusa, cuando haya reticencia o dificultades para asignar valores cuantitativos a los factores o a sus pesos. La información generada, tanto en las zonificaciones como en la evaluación de CAU es un insumo para la generación de escenarios. El SADE facilita la toma de decisiones en un espacio participativo y contribuye a dar transparencia al proceso.

La Guía Metodológica sugiere tomar al municipio como unidad básica de administración y gobierno sin desligarse del desarrollo de la región, la(s) provincia(s) y la nación. En este sentido el Capítulo II generó las UBAs de la región NOA, lo cual permite disponer de una caracterización general de la región para definir lineamientos a aplicar en la generación de escenarios a nivel departamental, considerando las aptitudes para los diferentes usos.

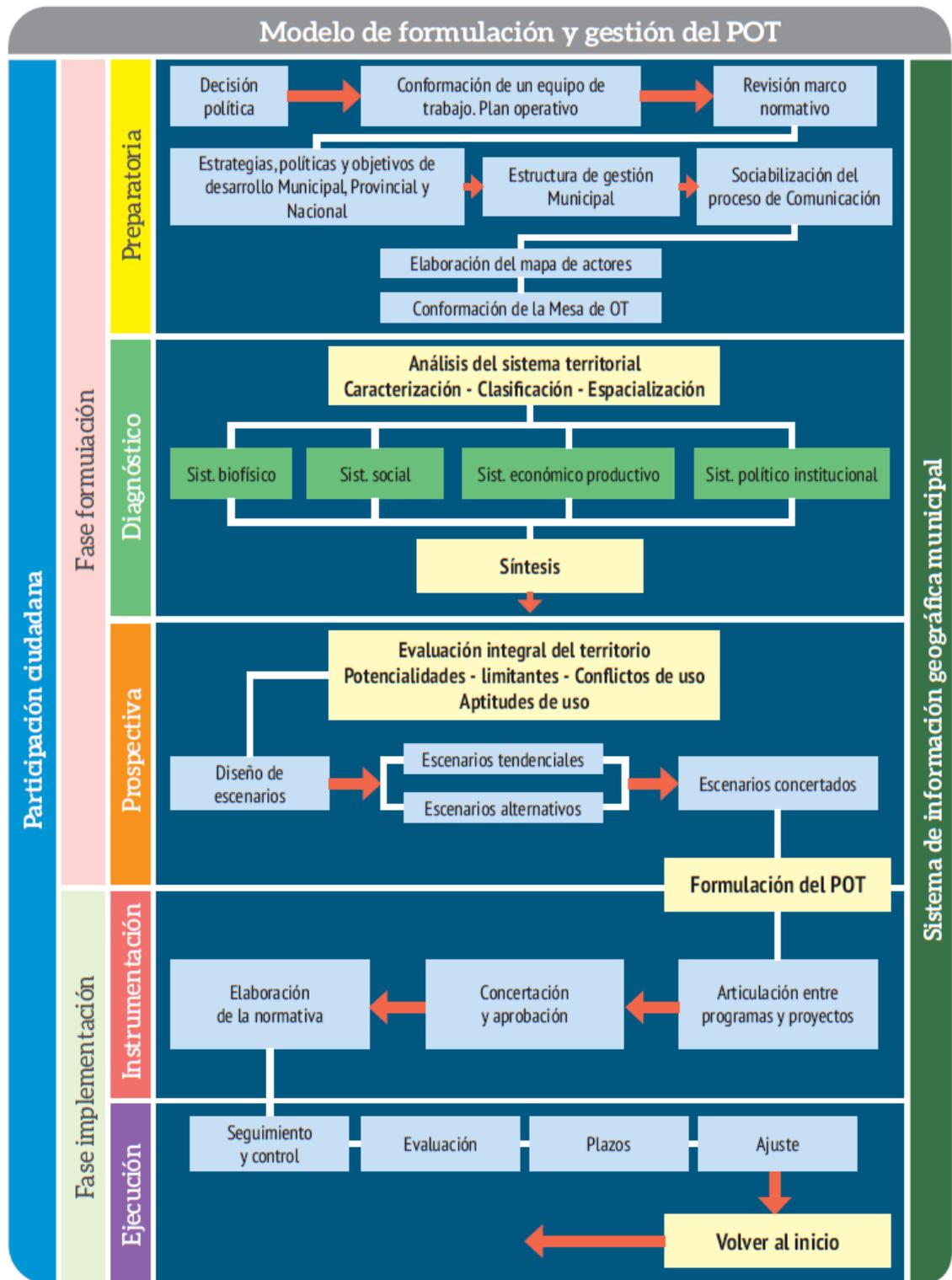


Figura 5.1. Ordenamiento territorial en el Municipio. Una guía metodológica. Fuente: Méndez Casariego y Pascale Medina, 2014. POT significa Plan de Ordenamiento Territorial

b) *Comparación crítica de la metodología con otras metodologías utilizadas en la formulación de planes de ordenamiento.*

La metodología tiene puntos en común y complementariedad con otras metodologías propuestas. Se analizarán la metodología utilizada por Somma et al. (2011), una propuesta elaborada por Paruelo et al. (2014) para incorporar los SE en el proceso de OTR y la metodología utilizada por Achinelli et al. (2011) que utiliza EMC para definir jerarquías entre distintos paisajes de acuerdo al nivel de provisión de un SE.

Somma propone un sistema espacial de soporte de decisiones multicriterio-multiobjetivo para el OT de los bosques nativos de la Provincia de Salta acorde a la Ley 26.331. Para obtener la zonificación, considera de manera jerárquica cuatro criterios principales, siendo el de mayor jerarquía la conservación de cuencas hidrográficas, que definió el número máximo posible de hectáreas a desmontar por cada cuenca, luego considera como restricción y excluye del análisis las áreas de comunidades indígenas y uso tradicional campesino. En una jerarquía inferior, realiza un análisis de localización multiobjetivo para seleccionar iterativamente las mejores áreas para conservación de la biodiversidad y la producción agropecuaria. En este trabajo se utiliza métodos de EMC y a través de una secuencia de pasos se genera el escenario final de zonificación territorial de bosques nativos que define por un lado, una red ecológica (áreas de conservación, zonas de conexión y corredores) y áreas productivas que no superan el umbral admisible de hectáreas de desmonte por cuenca hidrográfica, excluyendo las áreas de ocupación comunitaria. Una cuestión novedosa que propone Somma es el abordaje a nivel de cuenca y la definición del umbral admisible de desmonte que se puede relacionar con la determinación de niveles de pérdida tolerable de SE clave, que también fue propuesto por Paruelo et al. (2014) en su plan operativo para incorporar los SE, desarrollado a continuación.

Paruelo et al. (2014) proponen un plan operativo para incorporar los SE en el proceso de OTR basado en una serie de pasos que incluyen la definición de los SE finales clave para el territorio en cuestión, la identificación de los principales factores de estrés y perturbación que modifican el nivel de provisión de los SE, la identificación, caracterización y mapeo de los procesos ecológicos críticos (SE intermedios), la definición de funciones de afectación y de producción de SE, la determinación de niveles de pérdida tolerable de SE clave y, por último, la construcción de escenarios espacialmente explícitos de provisión de SE para la evaluación de la vulnerabilidad socioambiental.

Los autores plantean que algunas cuestiones se pueden abordar desde lo científico-técnico, como las funciones de producción de SE finales propuestas por Viglizzo et al. (2011) y otras como: ¿cuáles SE son más importantes? o ¿qué nivel de pérdida de provisión de un SE será tolerado? ¿se vinculan a valores e intereses de los actores involucrados?. Este esquema ha sido usado en el mapeo de los SE finales en el marco del proceso de OT del partido de Balcarce en la Provincia de Buenos Aires (Barral y Maceira 2011, 2012). Barral y Maceira (2012) afirman que la evaluación ambiental estratégica basada en los SE es una herramienta poderosa para prevenir costos ambientales negativos de planes de usos de la tierra, que pueden pasar desapercibidos bajo las técnicas de evaluación de impacto ambiental tradicionales.

Claramente este enfoque puede ser complementario a la metodología utilizada en esta tesis, ya que da la posibilidad de generar escenarios, haciendo explícitos los cambios en la provisión de los SE finales clave que tendrán lugar en distintas configuraciones del paisaje. De esta manera se “transparenta” el proceso de evaluación, a través de la cuantificación del nivel de cambio en la provisión de un SE clave dado un

nivel de estrés o perturbación producidos por los usos de suelos propuestos. Es especialmente aplicable en aquellas áreas de usos múltiples en conflicto, para facilitar el análisis por parte de los actores, de las posibles consecuencias sobre los SE clave, causadas por los diferentes escenarios propuestos.

En esta etapa, como se sugiere en el trabajo de Zhang et al. (2012) en su propuesta de modelo de construcción de consenso para resolver conflictos entre diferentes actores con intereses en puja, deben participar actores y planificadores. Zhang sugiere que la deliberación de propuestas de usos de la tierra debe ser un proceso iterativo de evaluación de propuestas individuales o de grupos de actores, incorporación de cambios a partir de sugerencias, discusión y evaluación de las propuestas mejoradas, hasta alcanzar una propuesta de uso de la tierra aceptable. La cuantificación de los SE, como concluye Paruelo et al. (2014) dista de ser una panacea o una solución mágica para arribar a un plan sin conflictos ni disputas, pero aporta evidencias que acotan las disputas o permiten encuadrarlas en una base racional.

Achinelli et al. (2011) utiliza EMC para identificar paisajes con distinto grado de provisión del servicio ecosistémico intermedio amortiguación hídrica en los esteros del Iberá. Comparando con la metodología de esta tesis, en ambos casos el objetivo es proveer información útil para la toma de decisiones respecto del OT, la diferencia radica en que, en este trabajo se utiliza EMC para evaluar la capacidad de acogida para un uso de suelo y en Achinelli et al. (2011) se jerarquizan las áreas en función del grado de provisión de un SE clave para la preservación de áreas ecológicas críticas en la Provincia de Corrientes. Estos resultados se pueden integrar sin dificultad en modelos de CAU que incorporen como factores los niveles de provisión de SE claves para un territorio particular.

c) La primera experiencia a nivel nacional de ordenamiento territorial (Ley 26331): aportes posibles

En este apartado se hace mención a la implementación de la Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos (Ley 26331) y al modo en que la propuesta metodológica de esta tesis puede contribuir a la definición de un protocolo de trabajo para la realización de las actividades de sustento técnico.

La Ley de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos (Ley 26331) sancionada en el 2007 es la primera experiencia a nivel nacional de ordenamiento territorial que regula cambios en el uso del suelo y establece que cada provincia debe definir el ordenamiento territorial de bosques nativos (OTBN) mediante un proceso participativo, utilizando diez criterios de sustentabilidad ambiental con el fin de zonificar el bosque nativo en tres categorías (categoría I, rojo, sectores de muy alto valor de conservación; categoría II, amarillo, sectores de alto o medio valor de conservación; categoría III, verde, sectores de bajo valor de conservación) (García Collazo et al., 2013).

García Collazo y Paruelo (2014) analizaron la zonificación derivada de la ley y señalan algunas cuestiones acerca de su definición: Las categorías de conservación cambian abruptamente entre provincias, existe una gran disparidad en la interpretación de los criterios de sustentabilidad ambiental y contrastantes calidades técnicas, en muy pocas provincias ha sido empleada la metodología multicriterio, algunas de ellas no explicitaron los pesos relativos de cada uno de los criterios y los umbrales a partir de los cuales un área fue asignada a una u otra categoría. Cada provincia trató los criterios

establecidos en la Ley con diferente sustento técnico (metodología de valorización y ponderación, referencia bibliográfica), hubo criterios que no fueron especificados en los informes.

El documento “Pautas metodológicas para las actualizaciones de los OTBN” aprobado por resolución 236/2012 establece pautas sobre la consideración de los criterios de sustentabilidad ambiental haciendo hincapié en el sustento técnico. Este documento establece que los informes deben incluir la información utilizada, describir la metodología de valorización y ponderación de manera geográfica para que resulte una metodología verificable.

García Collazo y Paruelo (2014) también sostienen que la Ley N° 26.331 representa un hito en la legislación ambiental argentina, ya que a partir de ella se ha instalado en todas las provincias, la necesidad de considerar la manera en la cual se distribuyen las actividades productivas en el territorio y que el proceso de zonificación es un avance muy significativo al visibilizar la problemática del OT y promover un debate amplio y participativo incorporando a actores excluidos del debate público (pueblos originarios, comunidades criollas y campesinas) (García Collazo et al., 2013).

Para contribuir a sortear algunas de las dificultades técnicas es posible adaptar el modelo de CAU para conservación teniendo en cuenta las pautas establecidas “Pautas metodológicas para las actualizaciones de los OTBN” generando un protocolo de trabajo objetivo, replicable y flexible para adaptarlo a las características particulares de las diferentes regiones del país. Este protocolo debe definir los datos a considerar, la escala, el método EMC y los umbrales para categorizar los resultados en las 3 categorías (rojo, verde, amarillo). El SADE puede ser usado en los espacios participativos de debate público, con el fin de facilitar los procesos técnicos: permite estandarizar las variables, obtener las ponderaciones a partir de la construcción de la matriz de comparación por pares, utilizar técnicas de EMC y categorizar los resultados de acuerdo a los umbrales consensuados en el protocolo.

5.2. A cerca de los resultados

En esta sección se discutirán algunos resultados obtenidos en los diferentes capítulos en relación al OT de la región.

5.2.1. Resultados de las zonificaciones biofísicas, socio-económicas y político-institucional del NOA

De los resultados alcanzados se subrayan algunos aspectos, con el fin de reforzar la necesidad de planificar acciones a escala regional que los contemplen:

El 59% de los suelos no son aptos para uso agropecuario (Capítulo II, Figura 2.6), el 37% de los suelos corresponde a climas de altura (Capítulo II, Figura 2.4) y el 34% de los suelos corresponde a tierras de pendiente moderada a escarpada (Capítulo II, Figura 2.5). Esta clasificación de zonas, sugiere la necesidad de proponer otras alternativas de uso en estas áreas, tales como conservación o ecoturismo, para no afectar la capacidad del ecosistema de proveer servicios de protección del suelo, conservación de la biodiversidad, control de disturbios, entre otros (Viglizzo et al., 2011). Esta categorización contribuye a definir a escala regional, el acceso y usufructo de los bienes y servicios provistos por los ecosistemas destinados tanto a la producción como a la conservación (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2012).

Las regiones socioeconómicas resultantes, constituyen espacios homogéneos que pueden utilizarse como punto de partida para la focalización de intervenciones relacionadas con la educación, salud, acceso a servicios básicos, vivienda y el desarrollo del potencial económico y productivo de la región (Jiménez, 2009). Algunas cuestiones que se hicieron visibles fueron:

- Los desequilibrios en las condiciones de vida, como base para un tratamiento diferenciado en función de necesidades básicas de la población. Por ejemplo, la región 5 de la zonificación socio-habitacional (Capítulo II, Figura 2.8) muestra la peor situación de la región NOA, sus características son NBI muy superior a la media con deficiencias en condiciones educacionales, de habitabilidad y de servicios y, hacinamiento muy alto. Esta región comprende 17 de los 27 departamentos de Santiago del Estero, 1 departamento de Salta, 1 departamento de Jujuy y 1 departamento de Catamarca.

- El índice de suficiencia ferroviaria muestra que 79 de los 99 departamentos del NOA tienen oferta de infraestructura ferroviaria baja (Capítulo II, Figura 2.16), lo que pone de manifiesto la necesidad de mejorar o incrementar la infraestructura existente para favorecer el desarrollo.

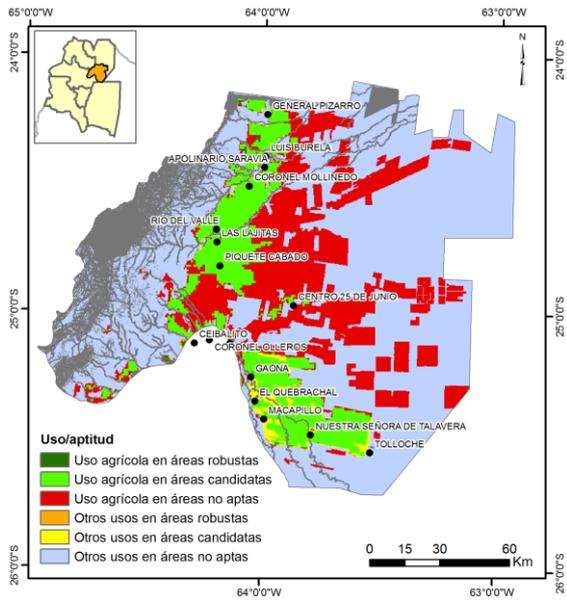
Respecto a la distribución de la población se destaca que solo 15 de los 99 departamentos presentan distribución regular u homogénea (Capítulo II, Figura 2.17). Tomando el supuesto de que una distribución homogénea de poblaciones favorece una ocupación espacial equilibrada y su desarrollo económico, queda explícita la necesidad de incrementar la accesibilidad y disponibilidad de los servicios para favorecer una ocupación más homogénea del territorio y contrarrestar la tendencia a concentrarse alrededor de determinados centros (capitales de provincias y ciudades principales).

5.2.2. Resultados de la aptitud y el uso de los suelos en el Departamento Anta.

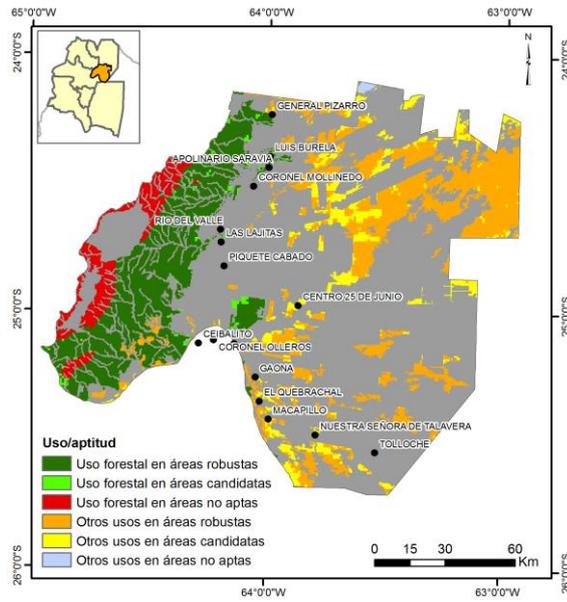
En primera instancia se hizo un análisis del uso actual del suelo en relación a las áreas robustas y candidatas para cada uso, obtenidas como resultado del análisis de incertidumbre realizado en el capítulo IV.

Se usó como fuente de datos de uso del suelo, el mapa de Morales Ponclava et al. (2012). Se superpuso cada uno de los mapas de incertidumbre, al mapa de uso de suelos y se definieron 3 categorías para cada uso de suelos: áreas de concordancia, áreas de discordancia y áreas potenciales de expansión. Se consideran áreas de concordancia a aquellas en las que el uso se desarrolla en áreas robustas o candidatas. Se denominan áreas de discordancia a los usos que se realizan en zonas no aptas para ese uso. Por último las áreas potenciales de expansión son aquellas que fueron categorizadas como áreas robustas y candidatas pero en ellas se realiza otra actividad.

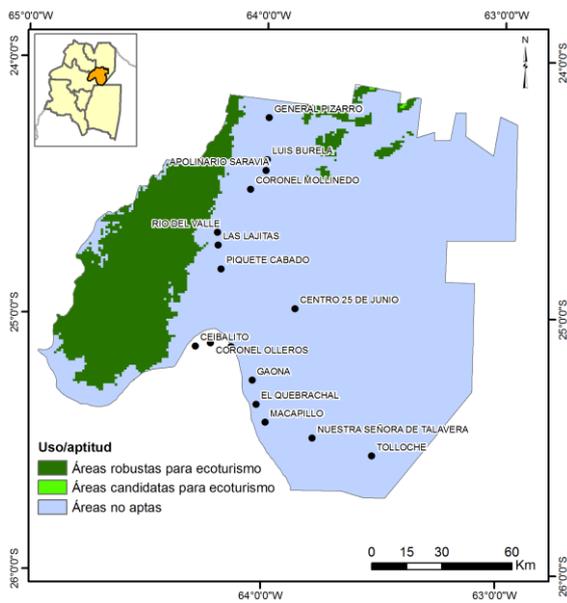
Debido a que el mapa de usos no considera el ecoturismo, se mapearon las áreas robustas, candidatas y no aptas. En el caso del uso de conservación, no se sometieron a análisis de incertidumbre, las áreas actuales (reserva de biosfera, parques nacionales, provinciales o municipales), razón por la cual estas áreas fueron incluidas en la categoría de áreas robustas. Los mapas se muestran en la Figura 5.2 y las superficies en ha de cada categoría se presentan en la Tabla 5.1. Las áreas robustas para ecoturismo suman una superficie de 434.188 ha, las áreas candidatas 681 ha y las áreas no aptas 1.793.994 ha.



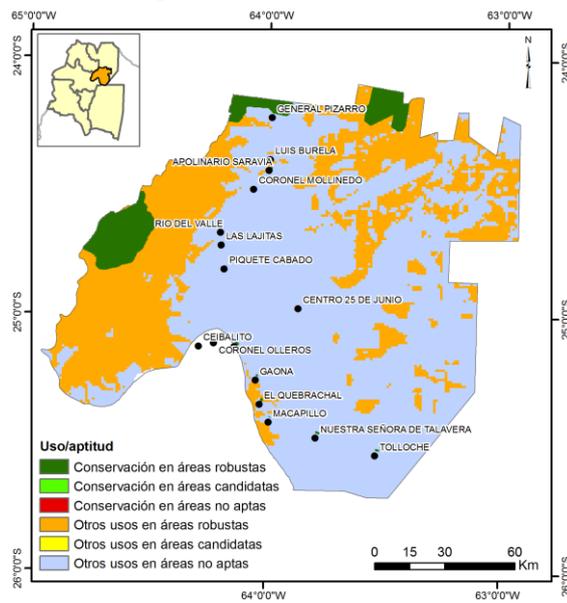
a) Agricultura



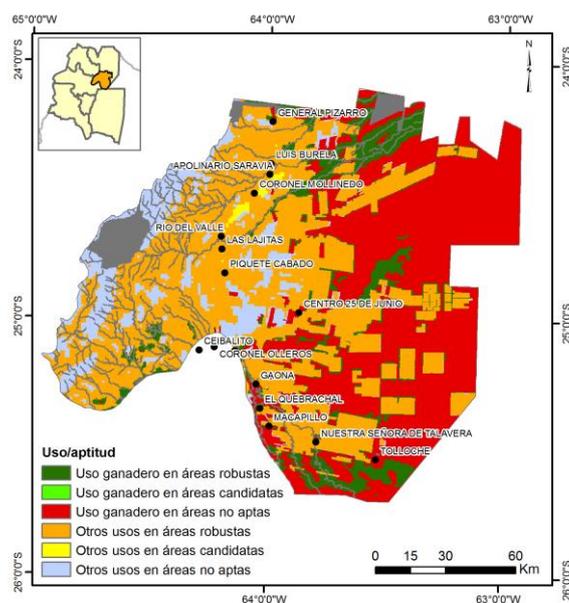
b) Aprovechamiento forestal del bosque nativo



c) Ecoturismo



d) Conservación



e) Ganadería

Figura 5.2. Mapas de relación uso actual/aptitud teniendo en cuenta las áreas robustas, candidatas y no aptas derivadas del análisis de incertidumbre.

Estos resultados muestran la concordancia/discordancia de los usos de suelos en relación a su aptitud. A partir de este análisis, podemos concluir que la habilitación de tierras para usos agropecuarios no se hizo de acuerdo a su capacidad para albergar esos usos. En relación a esto, Volante (2014) propone el nombre de Tsunami al modelo de cambio de uso de suelo del NOA, algunas de sus características son: la existencia de zonas núcleo que actúan como centros de propagación, el avance de la frontera se propaga como una ola hasta el agotamiento total de áreas naturales y genera anillos concéntricos de paisajes que se caracterizan por poseer una composición agropecuaria y probabilidad de desmontes decreciente (del centro a la periferia)

Tabla 5.1. Superficies de áreas de concordancia, discordancia y áreas potenciales de expansión de los usos de suelos

Relación aptitud/uso	Áreas de concordancia		Áreas de discordancia	Áreas potenciales de expansión	
	En áreas robustas	En áreas candidatas	En áreas no aptas	Otros usos en áreas robustas	Otros usos en áreas candidatas
Agricultura	5.475 ha 0,2%	269.156 ha 11,7%	459.881 ha 20,1%	4.300 ha 0,19%	31.025 ha 1,3%
Aprovechamiento forestal	336.525 ha 14,7%	13.575 ha 0,6%	84.138 ha 3,7%	454.500 ha 19,8%	171.588 ha 7,4%
Conservación	SA	SA	SA	707.419 ha 30,9%	0 ha 0%
Ganadería	209.794 ha 9,2%	6 ha 0%	775.313 ha 33,8%	971.256 ha 42,4%	7.594 ha 0,33%

La agricultura como actividad económica predominante, tiene posibilidades de expandirse sólo en un 1,5% de la superficie del departamento y un 20% del departamento posee uso agrícola en zonas no aptas. La ganadería, en cambio, ocupa un 34% de la superficie del departamento, en zonas no aptas y tiene posibilidades de

expansión en un 47% de la superficie departamental. Esto pone de manifiesto las consecuencias de la no implementación de políticas de OT.

La proporción de las áreas robustas respecto de las áreas candidatas fue para el caso de la agricultura de un 3,26%, mientras que en el resto de los usos de suelos la situación fue inversa con un predominio muy marcado de las áreas robustas sobre las áreas candidatas. Así, la proporción de áreas candidatas con respecto a las áreas robustas fue de 23% para el aprovechamiento forestal de los bosques nativos, 0% para conservación, 0,64% para ganadería y 0,16% para ecoturismo. Así podemos concluir que las zonas de alta aptitud para aprovechamiento forestal de bosques nativos, ecoturismo, conservación y ganadería extensiva tuvieron, en general, un desvío estándar menor al 10%, es decir baja incertidumbre. En el caso de la agricultura, el desvío estándar, en casi la totalidad de las áreas de alta aptitud, fue mayor al 10% (incertidumbre alta).

Según los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad (Capítulo IV, Figuras 4.12), se derivaron cuáles son los pesos que recogen una cantidad importante de variabilidad en los modelos, los denominaremos pesos dominantes. En el caso del modelo para uso agrícola destacan los pesos de los factores F4- Disponibilidad de riego (0,26), F3- Pendiente (0,25) y F1- Índice de productividad (0,21). Por su parte, en el modelo para aprovechamiento forestal del bosque nativo, los pesos que explican el mayor porcentaje de variabilidad fueron los de F2- Productividad primaria neta (0,5), F4- Pendiente (0,21) y F3- Altitud (0,18). En el modelo de CAU para ecoturismo, los pesos dominantes fueron los pesos de los factores F5- Pendiente (0,27) y F8- Distancia desde centros poblados (0,17). Los pesos dominantes del modelo de CAU para conservación fueron los pesos de F11- Pendiente (0,23) y F1- Heterogeneidad del paisaje (0,16). Por último, el AS del modelo CAU para ganadería extensiva, muestra que los pesos dominantes fueron los pesos de los factores F2- Áreas de sobreuso (0,25) y F3- Distancia a cuerpos de agua y cursos de agua (0,22).

5.3. Fortalezas y debilidades de la propuesta metodológica

El principal aporte de esta tesis es integrar herramientas utilizadas en otros ámbitos y aplicaciones para dar transparencia al proceso del OT en todas sus fases: diagnóstico, planificación y gestión. Por otra parte considera la multidimensionalidad y las escalas múltiples, partiendo de un diagnóstico regional de las potencialidades y limitaciones biofísicas, socio-económicas y político-institucionales y ajustándose luego a un espacio definido por límites políticos administrativos, en el cual, a partir de la capacidad de acogida para los usos considerados relevantes se puedan generar escenarios de usos de suelos, en base a los servicios ecosistémicos priorizados

En este apartado se hará mención a las fortalezas y debilidades o cuestiones que hayan quedado pendientes y que se pueden abordar a futuro.

Las fortalezas del desarrollo planteado en esta tesis se asocian a cuestiones metodológicas: el abordaje a múltiples escalas, desde lo regional a lo departamental; la utilización de bases de datos públicas de libre acceso, disponibles para todo el país, lo cual le confiere el carácter de transferible y replicable en otras regiones; la integración de las herramientas propuestas, en el SADE a través de la programación en software libre de los algoritmos desarrollados ad hoc, otorgando libertad para ejecutar el programa, estudiar cómo funciona y adaptarlo, redistribuir las copias y sus versiones mejoradas.

En cuanto a la elaboración de la propuesta se destaca: la utilización de procesos estadísticos variados, brindando un abanico de posibilidades para analizar múltiples variables y obtener de manera objetiva regiones o zonas con características homogéneas; la definición de modelos de CAU para cinco usos de suelos, que se pueden tomar como punto de inicio para hacer los ajustes que se consideren pertinentes; la incorporación de la lógica difusa como una alternativa para estandarizar los valores de los criterios utilizando diferentes funciones de pertenencia, en base a los umbrales de aptitud de las variables; la utilización de variables lingüísticas para definir reglas de decisión, dando la posibilidad a los actores de expresar con términos lingüísticos como “BAJO”, “MEDIO”, “ALTO” cuando haya dificultades para proveer un juicio numérico preciso acerca de un factor o peso; la obtención de mapas de capacidad de acogida para usos individuales y usos múltiples que muestran áreas de uso complementarios o en conflicto.

Los procesos de evaluación de aptitud de tierras poseen muchas fuentes de incertidumbre: la selección de criterios, la precisión de los datos de entrada, los métodos de estandarización, los pesos o ponderaciones de los criterios y los métodos de agregación (Burgman, 2005; Chen et al., 2010). Un área metodológica del proceso que ha recibido menos atención ha sido el análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito como un enfoque sistemático para dar cuenta de la incertidumbre inherente del proceso (Chen et al., 2011; Gómez Delgado and Bosque Sendra, 2004).

Un aporte sustancial de esta tesis es el análisis de la variación de los resultados a partir de diferentes perspectivas de los decisores (ponderaciones), cantidad de criterios considerados y los métodos de evaluación utilizados, como así también la aplicación de un método de análisis de sensibilidad e incertidumbre espacialmente explícito para evaluar las respuestas a las variaciones de los pesos. Como resultados se obtuvieron los mapas de aptitud promedio y los mapas de incertidumbre (desvío estándar) a partir de los cuales se mapearon las áreas robustas y candidatas para los distintos usos. A través del análisis de sensibilidad se identificaron cuáles son los pesos que más contribuyen a la variabilidad de los resultados del modelo.

También se destaca la base de datos geográfica generada en esta investigación, como una contribución para el mejoramiento de la comprensión de la distribución espacial de algunas características y fenómenos territoriales que hasta la fecha no habían sido representados en forma cartográfica.

La información es un factor de poder y puede actuar como carta de negociación sobre el uso del territorio, contribuye a generar valores a partir de la construcción de la percepción de futuro, de riesgos y amenazas, pero también de las oportunidades que presenta el territorio (Diéguez et al., 2014). Diéguez et al. (2014) mencionan algunas barreras que pueden afectar el flujo de información: dispersión y fragmentación de la información, baja calidad o incertidumbre acerca de ella, la falta de visibilidad (desconocida por los usuarios) o la falta de asimilación política de la información (desvalorización). Para sistematizar la información, sus metadatos y darle visibilidad/accesibilidad a la información, sugiere fortalecer la IDERA (Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina), una comunidad de información geoespacial que tiene como objetivo la democratización del acceso de la información producida por el Estado y diversos actores.

Para mejorar el flujo de información en el proceso de OT, se podría definir un protocolo de accesibilidad que incluya la definición de los datos que cada Institución (IGN, INDEC, Universidades Nacionales, Instituto Nacional del Agua - INA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA, Instituto Nacional de Asuntos Indígenas – INAI, Administración de Parques Nacionales, entre otros) debe poner a disposición pública a través de servicios OGC (Open Geoespacial Consortium). Estos servicios permiten el acceso a la información cartográfica de una forma estándar e interoperable a través de Internet, los más habituales son: Web Map Service (WMS), Web Coverage Service (WCS) y Web Feature Service (WFS).

La información que se genera y el conocimiento que de ella derivan no son saberes estáticos y la propia dinámica del sistema socio-ecológico forzará su revisión y adecuación en forma periódica (Diéguez et al., 2014). En este trabajo se generó una base de datos geográfica que puede conformar el núcleo de un Sistema de Información Territorial (SIT) para la gestión y que a través de un enfoque colaborativo y participativo puede constituirse en un observatorio de prácticas territoriales (OPT). Un OPT puede definirse como un dispositivo socio-técnico de gestión de la información, elaborado colectivamente por los actores del rurales que actúan en un territorio dado, haciendo frente a los desafíos territoriales (Benoît et al., 2015). Una de las finalidades de este OPT para contribuir a la gestión territorial debe ser facilitar el monitoreo por parte de los actores del territorio, de la implementación de las políticas públicas y sus consecuencias territoriales, herramienta fundamental para la gestión territorial.

La metodología de OT propuesta puede enriquecerse con la incorporación del enfoque de servicios ecosistémicos. Esto se pone de manifiesto en diversos trabajos (Mastrangelo et al., 2015; Mastrangelo y Laterra, 2015; Cáceres et al., 2015) y se reafirman en la Ley 26.331. Las preferencias de los actores sobre los SE refleja los beneficios tangibles e intangibles que obtienen de los ecosistemas y tienen una fuerte influencia sobre la motivación de los actores para administrar los ecosistemas con el fin de mejorar el suministro de los SE valiosos, o apoyar políticas para este fin (Mastrangelo et al., 2015). El enfoque de los SE al incorporar elementos de las ciencias sociales permite producir conocimientos sobre las personas, cuando dan a conocer sus preferencias a través de cuestionarios y/o entrevistas (Mastrangelo y Laterra, 2015; Cáceres et al., 2015).

La Ley 26331 introduce el mecanismo de compensación por servicios ambientales (o servicios ecosistémicos, más propiamente). Este es el primer antecedente en la legislación argentina de uso del concepto de servicios ecosistémicos y uno de los pocos a nivel latinoamericano (Balvanera et al., 2012).

Si bien no fue incorporado en esta tesis, se plantea en el capítulo I la necesidad de generar escenarios futuros de usos de suelo y cuantificar sus impactos en base a las pérdidas o incrementos de provisión de servicios ecosistémicos para las distintas alternativas de distribución de las actividades en el territorio, que surjan de las demandas de los actores sociales y tengan en cuenta en el algoritmo de asignación o generación del escenario las aptitudes de los establecimientos para los distintos usos. También es posible incorporar como factores los niveles de provisión de SE claves para un territorio particular.

La metodología propuesta complementa, facilita y se articula con las actividades de sustento social a través de las cuales se logra la participación de los actores rurales para que los resultados obtenidos sean aceptados por los actores

involucrados en el desarrollo del territorio. Es una demostración de la utilidad de las herramientas y una base de discusión para la elaboración de un protocolo estandarizado y consensado que permita abordar los aspectos técnicos del OTR.

5.4. Bibliografía

- Achinelli, M., R. Perucca & H. Ligier. 2011. Evaluación multicriterio para la zonificación del servicio ecosistémico en el macrosistema Iberá: amortiguación hídrica. In: Lateral, P., Paruelo, J.M., Jobbágy, E. (Eds.), Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. INTA, Buenos Aires, pp. 485-509.
- Balvanera, P., M. Uriarte, L. Almeida, A. Altesor, F. Declerk, T. Gardner, et al. 2012. Ecosystem Services research in latin America: the state of the art. *Ecosystem Services*, 2:56-70.
- Barral, M. & N. Maceira. 2011. Evaluación ambiental estratégica del ordenamiento territorial. Un estudio de caso para el partido de Balcarce basado sobre el análisis de Servicios Ecosistémicos. En Lateral, P., E. Jobbágy y J.M. Paruelo (eds.) Valoración de Servicios Ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA.
- Barral, M. & N. Maceira. 2012. Land-use planning based on ecosystem service assessment: A case study in the Southeast Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154:34-43.
- Benoit, M. 2015. Observatories of territorial practices: a tool to contribute to sustainable development of territories and performance of production systems. Aceptado para su presentación en el 5th International Symposium for Farming Systems Design, Montpellier, 7-10 Septiembre de 2015.
- Burgman, M. 2005. Risks and decisions for conservation and environmental management. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Cáceres, D., E. Tapella, F. Quétier, S. Díaz. 2015. The social value of biodiversity and ecosystem services from the perspectives of different social actors. *Ecol. Soc.* 20 (1), 62.
- Chen, Y., J. Yu, & S. Khan. 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1582-1591.
- Chen, H., M. Wood, C. Linstead & E. Maltby. 2011. Uncertainty analysis in a GIS based multi-criteria analysis tool for river catchment management. *Environmental Modelling & Software*. 26(4), 395-405.
- Dieguez, H., E. Jobbágy, S. Torrella, K. Zelaya, L. Mochi & M. zaccagnini. 2014. La información en los procesos de Ordenamiento Territorial. Capítulo 8. En J. Paruelo, E. Jobbágy, P. Lateral, H. Diéguez, M. García Collazo & A. Panizza (eds.), Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-92-5-308619-1.
- García Collazo M., A. Panizza & J. Paruelo. 2013. Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos: Resultados de la Zonificación realizada por provincias del Norte argentino. *Ecología Austral* 23:97-107.

- García Collazo M. & J. Paruelo. 2014. Ordenamiento territorial de bosques nativos: resultados de la zonificación en la Argentina. Capítulo 18. En J. Paruelo, E. Jobbágy, P. Laterra, H. Diéguez, M. García Collazo & A. Panizza (eds.), Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-92-5-308619-1.
- Gómez Delgado, M. & J. Bosque Sendra. 2004. Sensitivity analysis in multicriteria spatial decision making: a review. *Human and ecological risk assessment* 10(6): 1-15.
- Jiménez, A. 2009. Regionalización de Honduras: Hacia la construcción de regiones-plan a través del análisis espacial cuantitativo. Capítulo 19. En Buzai (Ed.), Geografía y Sistemas de Información Geográfica: Aspectos conceptuales y aplicaciones. GESIG - Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-05-7535-1.
- Mastrangelo, M. & P. Laterra. 2015. From biophysical to social-ecological trade-offs: integrating biodiversity conservation and agricultural production in the Argentine Dry Chaco. *Ecol. Soc.* 20, 20.
- Mastrangelo, M., F. Weyland, L. Herrera, S. Villarino, M. Barral & A. Auer. 2015. Ecosystem services research in contrasting socio-ecological contexts of Argentina: Critical assessment and future directions. *Ecosystem Services* 16: 63-73.
- Méndez Casariego, H & C. Pascale Medina. 2014. Ordenamiento Territorial en el Municipio: una guía metodológica. FAO. Santiago, Chile. 72 pp.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2012. Bases para el Ordenamiento del Territorio Rural Argentino. Ed. Minagri.
- Morales Poclava, M., L. Lizarraga, H. Elena, Y. Noé, J. Mosciaro, L. Vale, H. Paoli, y J. Volante. 2012. Uso del suelo en el noroeste argentino (NOA) mediante Land Cover Classification System (LCCS-FAO) - Año 2007. Inedito.
- Paruelo, J., P. Laterra & E. Viglizzo. 2014. Un plan operativo para incorporar los Servicios Ecosistémicos en el proceso de Ordenamiento Territorial. Capítulo 10. En J. Paruelo, E. Jobbágy, P. Laterra, H. Diéguez, M. García Collazo & A. Panizza (eds.), Ordenamiento Territorial Rural. Conceptos, métodos y experiencias. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-92-5-308619-1.
- Somma, D., J. Volante, L. Lizárraga, M. Boasso, M. Mosciaro, M. Morales Poclava, M. Abdo, S. Castrillo, J. Zamora, K. Reynolds, and J. Ramos. 2011. Aplicación de análisis multicriterio-multiobjetivo como base de un sistema espacial de soporte de decisiones para la planificación del uso sustentable del territorio en regiones forestales, caso de estudio: los bosques nativos de la Provincia de Salta. Capítulo 18. En P. Laterra, J. M. Paruelo, and E. Jobbágy (eds). Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. INTA, Buenos Aires, Argentina.

- Viglizzo E., F. Frank, L. Carreño, E. Jobbágy, H. Pereyra, J. Clatt, D. Pince & M. Ricard. 2011. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology* 17:959-973.
- Volante, J. 2014. Dinámica y consecuencias del cambio en la cobertura y el uso del suelo en el Chaco Semi-Árido. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. Disponible en <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2014volantejose.pdf>
Consultado el 6/04/17
- Zhang, Y., A. Li & T. Fung. 2012. Using GIS and Multi-criteria Decision Analysis for Conflict Resolution in Land Use Planning. *Procedia Environmental Sciences* 13(0): 2264-2273.

Tabla A.1. Unidades cartográficas de suelos (grandes grupos de los suelos dominantes) reclasificadas *ad hoc* en función de la aptitud para uso agropecuario más frecuente de los suelos pertenecientes a ese gran grupo.

Grangrupo	Aptitud
Argiudoles	No apto
Argiustoles	No apto
Calciustoles	No apto
Cambortides	No apto
Complejo indiferenciado	No apto
Dique	No apto
Duracuoles	No apto
Durustalfes	No apto
Durustoles	Moderadamente apto
Halacueptes	No apto
Hapludalfes	Moderadamente apto
Hapludoles	No apto
Haplumbreptes	No apto
Haplustalfes	Moderadamente apto
Haplustoles	No apto
Lagunas	No apto
Miscelaneas	No apto
Natracualfes	No apto
Natracuoles	No apto
Natrustalfes	Moderadamente apto
Natrustoles	Moderadamente apto
Paleoargides	No apto
Paleustalfes	Moderadamente apto
Paleustoles	No apto
Rocas	No apto
Salinas	No apto
Salortides	No apto
Torrifluventes	No apto
Torriortentes	No apto
Torripsamentes	No apto
Ustifluventes	No apto
Ustipsamentes	No apto
Ustocreptes	No apto

Tabla A.2. Condiciones demográficas de la Población.

POB_014 - Población de 0 a 14 años, POB_1564 - Población de 15 a 64 años, POB_65M - Población mayor a 65 años, DENS_POB - Densidad poblacional, habitantes/Km2, IND_MASC - Índice de masculinidad, IND_DEP_POT - Índice de dependencia potencial, personas potencialmente inactivas por cada 100 potencialmente activas. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGIO N	POB_014	POB_1564	POB_65M	DENS_POB	IND_MASC	IND_DEP_POT
1	-0,6	0,11	1,26	-0,14	1,07	-0,14
2	-0,9	1,27	-0,67	0,08	-0,49	-1,19
3	-1,19	1,38	-0,2	0,09	-0,97	-1,29
4	1,76	-1,86	-0,16	-0,15	-0,62	1,95
5	1,45	-1,62	0,11	-0,14	0,94	1,67
6	-0,56	0,82	-0,53	0	-0,56	-0,82

Tabla A.3. Condiciones de habitabilidad.

HAB_VIV - Promedio de habitantes por vivienda, HAB_CASA - Habitantes en casa, HAB_RANC - Habitantes en rancho, HAB_CASI - Habitantes en casilla, HAB_DEPTO - Habitantes en departamentos, HAB_HOT_PENS - Habitantes en hotel o pensión o inquilinato, HAB_LOC_NH - Habitantes en local no construido para habitación, HAB_VIV_MOV - Habitantes en vivienda móvil, HACIN - Hacinamiento crítico, más de 3 personas por cuarto, calculado como el cociente entre la cantidad total de personas del hogar y la cantidad total de habitaciones o piezas de que dispone el mismo. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGION	HAB_VIV	HAB_CASA	HAB_RANC	HAB_CASI	HAB_DEPTO	HAB_HOT_PENS	HAB_LOC_NH	HAB_VIV_MOV	HACIN
1	-0,87	0,62	-0,5	0,01	-0,41	-0,74	0,82	-0,4	-0,31
2	-0,14	0,9	-0,71	-0,04	-0,31	-0,56	-0,06	-0,59	-0,94
3	0,05	0,38	-0,68	-0,03	2,31	1,15	-0,21	-0,21	-0,48
4	-0,92	-0,45	0,59	-0,46	-0,43	0,06	-0,36	0,36	-0,22
5	0,64	-1,92	2,06	-0,63	-0,45	-0,6	0,08	0,36	1,58
6	0,44	0,6	-0,74	1,23	0,51	-0,38	-0,21	-0,4	-0,09

Tabla A.4. Distribución en zonas urbanas y rurales.

VIV_URB - Viviendas en área urbana, VIV_RUR_AGRU - Viviendas en área rural agrupada, VIV_RUR_DISP - Viviendas en área rural dispersa. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGION	VIV_URB	VIV_RUR_AGRU	VIV_RUR_DISP
1	-1,01	0,33	1,36
2	1,21	-0,7	-1,2
3	1,38	-0,81	-1,38
4	-1,56	1,31	1,25
5	-0,66	-0,03	1,15
6	0,74	-0,82	-0,33

Tabla A.5. Condiciones educacionales.

PRI_COM- Máximo nivel educativo alcanzado: primario completo, incluye nivel primario y EGB, SEC_COM - Máximo nivel educativo alcanzado: secundario completo, incluye nivel secundario y polimodal, TER_UNI_COM - Máximo nivel educativo alcanzado: terciario universitario completo, incluye nivel terciario y universitario, POSUNI_COM - Máximo nivel educativo alcanzado: postuniversitario completo, TASA_ANALF - Tasa de

analfabetismo. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGION	PRI_COM	SEC_COM	TER_UNI_COM	POSUNI_COM	TASA_ANALF
1	2,04	-0,49	-0,49	-0,39	-0,44
2	-1,38	1,66	2,23	2,8	-1,32
3	-1,5	1,37	1,21	1,01	-0,88
4	-0,6	-1,23	-0,76	-0,39	2,62
5	0,41	-1,36	-1,29	-0,59	0,87
6	0,44	0,22	0,34	-0,19	-0,66

Tabla A.6. Régimen de tenencia de la vivienda.

PROPIET – Propietario, INQUIL – Inquilino, OCUPANT- Ocupante por préstamo o trabajo. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGION	PROPIET	INQUIL	OCUPANT
1	0,63	-1,07	-0,18
2	0,34	-0,02	-0,46
3	-0,49	1,56	-0,3
4	0,44	0,2	-0,5
5	1,11	-1,29	-0,74
6	0,3	-0,47	-0,25

Tabla A.7. Infraestructura de servicios.

AGUA_RED - Hogares con suministro de agua por red pública, AGUA_MOT - Hogares con suministro de agua por motobombeador, AGUA_MAN - Hogares con suministro de agua por bomba manual, AGUA_POZO - Hogares con suministro de agua por pozo, AGUA_OTRO - Hogares con suministro de agua por otro medio, DESC_RED - Hogares con descarga a red pública, DESC_CAM_POZO - Hogares con descarga a cámara séptica, DESC_POZO - Hogares con descarga a pozo, SIN_INOD - Hogares sin inodoro. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGION	AGUA_RED	AGUA_MOT	AGUA_MAN	AGUA_POZO	AGUA_OTRO	DESC_RED	DESC_CAM_POZO	DESC_POZO	SIN_INOD
1	-0,67	1,04	0,82	0,66	-0,04	-0,78	0,51	0,52	0,29
2	0,88	-0,03	-0,33	-0,58	-0,78	-0,6	2,22	-1,21	-1,02
3	1,25	-0,63	-0,34	-0,73	-0,94	2,15	-1,14	-1,62	-1,15
4	-0,7	-0,66	-0,34	0,28	1,11	-0,58	-0,8	1,46	0,92
5	-1,77	-0,45	0,22	0,48	2,25	-0,89	-0,57	1,29	2,02
6	0,88	0,08	-0,04	-0,52	-0,92	1	-0,48	-0,7	-0,82

Tabla A.8. Calidad constructiva de la vivienda y calidad de conexión a servicios.

Calidad de los materiales con que están construidas las viviendas (material predominante de los pisos y techos): CALI_MATER1 - la vivienda presenta materiales resistentes y sólidos tanto en el piso como en techo; presenta cielorraso, CALI_MATER2 - la vivienda presenta materiales resistentes y sólidos tanto en el piso como en el techo. Y techos sin cielorraso o bien materiales de menor calidad en pisos, CALI_MATER3 - la vivienda presenta materiales poco resistentes y sólidos en techo y en pisos, CALI_MATER4 - la vivienda presenta materiales de baja calidad en pisos y techos. Calidad de conexión a servicios básicos: refiere al tipo de instalaciones con que cuentan las viviendas para su saneamiento. Para este indicador, se utilizan las variables procedencia del agua y tipo de desagüe: CON_SERV_SATIS - refiere a las viviendas que disponen de agua a red pública y desagüe cloacal, CON_SERV_BAS - describe la situación de aquellas viviendas que disponen de agua de red pública y el desagüe a pozo con cámara séptica, CON_SERV_INSUF - engloba a las viviendas que no cumplen ninguna de las 2

condiciones anteriores. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGION	CALI_MAT ER1	CALI_MA TER2	CALI_MATE R3	CALI_MATE R4	CON_SERV_ SATIS	CON_SERV_ BAS	CON_SERV_ INSUF
1	-0,33	0,18	0,82	-0,34	-0,77	0,24	0,7
2	1,91	0,26	-0,64	-0,96	-0,6	2,42	-1,21
3	0,59	0,92	0,36	-0,97	2,17	-1	-1,72
4	-1,58	-1,38	0,42	1,34	-0,6	-0,76	1,31
5	-0,99	-0,43	-0,81	1,3	-0,88	-0,64	1,52
6	0,72	-0,6	1,35	-1	1	-0,44	-0,81

Tabla A.9. Necesidades Básicas Insatisfechas.

POB_NBI - Población con Necesidades Básicas Insatisfechas, HOG_NBI - Viviendas con Necesidades Básicas Insatisfechas. Referencias: naranja - muy superior a la media, amarillo – superior a la media, gris – cercano a la media, celeste – inferior a la media y azul (muy inferior a la media)

REGION	POB_NBI	HOG_NBI
1	0,05	0,04
2	-1,35	-1,34
3	-0,98	-0,97
4	0,56	0,78
5	1,87	1,84
6	-0,46	-0,47

Tabla A10. Expertos consultados: formación, especialidad, temas en los que hicieron aportes técnicos en el desarrollo de este trabajo. D1, D2, D3 Y D4 completaron la matriz de comparación para determinar los pesos de los criterios de todos los usos considerados.

Expertos consultados	Formación de grado/ postgrado	Temática/especialidad	Temas consultados
Rodolfo Renolfi	Ing. Agrónomo Mg. Producción y utilización de pasturas	Producción de carne en sistemas silvopastoriles	Criterios para evaluar CAU ganadería extensiva Cuantificación de variables categóricas (estandarización simple). Funciones de pertenencia difusas
Marcelo Navall	Ing. Forestal	Bosques nativos y sistemas silvopastoriles	Criterios para evaluar CAU aprovechamiento forestal del bosque nativo. Funciones de pertenencia difusas
Guillermo Merletti (D2)	Ing. Forestal	Manejo de bosques	Criterios para evaluar CAU aprovechamiento forestal del bosque nativo. Cuantificación de variables categóricas (estandarización simple). Funciones de pertenencia difusas. Matriz de ponderación
Dario Coria (D3)	Lic. en Ecología Mg. Manejo de vida silvestre	Ecología y manejo de vida silvestre	Criterios para evaluar CAU ecoturismo y conservación. Cuantificación de variables categóricas (estandarización simple). Funciones de pertenencia difusas.

			Matriz de ponderación.
Jose Volante (D4)	Lic. en Recursos Naturales Dr. en Ciencias Agropecuarias	Cambio de usos de suelos	Criterios para evaluar CAU de todos los usos. Funciones de pertenencia difusas. Matriz de ponderación.
Ramiro Salgado (D1)	Ing. Agrónomo Mg. Riego y Drenaje	Riego y drenaje	Criterios para evaluar CAU agricultura Cuantificación de variables categóricas (estandarización simple). Funciones de pertenencia difusas. Matriz de ponderación.
Andres Gonzalez	Ing. Forestal	Extensión Forestal	Criterios para evaluar CAU aprovechamiento forestal del bosque nativo.
Lucas Seghezzo	Lic. en Recursos Naturales Dr. en Ciencias del Medio Ambiente	Sustentabilidad de los sistemas productivos	Criterios para evaluar CAU de todos los usos. Funciones de pertenencia difusas.

Figura A1. Hoja de cálculo proporcionada a los expertos para calcular los pesos de los factores considerados para evaluar la capacidad de acogida para los distintos usos.

Factores	F1	F2	F3	F4	F5	
F1	1	4	1	6	4	
F2	0.25	1	0.33333333	4	1	
F3	1	3	1	6	4	
F4	0.16666667	0.25	0.16666667	1	0.5	
F5	0.25	1	0.25	2	1	
Suma columnas	2.66666667	9.25	2.75	19	10.5	

Factores	F1	F2	F3	F4	F5	Pesos
F1	0.375	0.43243243	0.36363636	0.31578947	0.38095238	0.374
F2	0.09375	0.10810811	0.12121212	0.21052632	0.0952381	0.126
F3	0.375	0.32432432	0.36363636	0.31578947	0.38095238	0.352
F4	0.0625	0.02702703	0.06060606	0.05263158	0.04761905	0.050
F5	0.09375	0.10810811	0.09090909	0.10526316	0.0952381	0.099

1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Extremadamente	Fuertemente	Modestamente	Ligeramente	Igual	Ligeramente	Modestamente	Fuertemente	Extremadamente								
MENOS IMPORTANTE								MÁS IMPORTANTE								

Tabla A11. Datos geográficos utilizados en la zonificación Biofísica, Socio-económica y Político-institucional del NOA.

Capa	Nombre	Tipo
Variables bioclimáticas extraídas de la Base de datos climática global Worldclim	worldclim	vectorial polígono
Categorías de pendientes: 3.Tierras a nivel, 2.Tierras de pendiente ligera, 1.Tierras con pendiente moderada y 0.Tierras escarpadas	pendiente_categ	vectorial polígono
Clases de suelos: 0.No apto, 1.Marginalmente apto y 2.Apto	suelos_clase	vectorial polígono
Zonificación bioclimática	zonif_bioclimatica	vectorial polígono
Zonificación biofísica	zonif_biofisica	vectorial polígono
Datos socio-habitacionales	sociohabitacional	vectorial polígono
Zonificación socio-habitacional	zonif_sociohabit	vectorial polígono
Índice de suficiencia ferroviaria	indice_suf_ferrov	vectorial polígono
Distribución espacial de los asentamientos de la población	Índice_Clark_Evans	vectorial polígono
Zonificación socioeconómica	zonif_socioecon	vectorial polígono
División política departamental	division_politica	vectorial polígono
Áreas restringidas por legislación	areas_restringidas_legislacion	vectorial polígono

Los datos vectoriales están disponibles en la base de datos sqlite **sadeNOA.sqlite**, se puede descargar desde http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/NOA/

Tabla A12. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida de uso agrícola.

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
F1- Índice de productividad	IProduct.tif	raster	Dato base
	z_IProduct.tif	raster	Dato estandarizado
F2- Cobertura del suelo	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	z_lccs_agricul.tif	raster	Dato estandarizado
F3- Pendiente	pendiente.tif	raster	Dato base
	z_pendiente_agricul.tif	raster	Dato estandarizado
F4- Disponibilidad de riego	areas_riego	vectorial polígono	Dato base
	z_areas_riego.tif	raster	Dato estandarizado
F5- Accesibilidad a centros poblados	población_cnpyv_2010	vectorial punto	Dato base
	red_vial	vectorial línea	Dato base
	accesibilidad_centros_poblados.tif	raster	Dato calculado
	z_accesibilidad_centros_poblados.tif	raster	Dato estandarizado
R1- Áreas naturales protegidas	areas_protegidas	vectorial polígono	Dato base
	r_areas_protegidas.tif	raster	Dato estandarizado
R2- Márgenes de cursos de agua	cursos_agua	vectorial línea	Dato base
	cursos_agua_buffer_300m	vectorial polígono	Dato calculado
	r_cursos_agua_buf_300m.tif	raster	Dato estandarizado
R3- Ejidos urbanos	ejidos_urbanos	vectorial polígono	Dato base
	r_ejidos_urbanos.tif	raster	Dato estandarizado
R4- Cuerpos de agua	cuerpos_agua	vectorial polígono	Dato base
	r_cuerpos_agua.tif	raster	Dato estandarizado
R5- Pendientes mayores a 15%	pendiente.tif	raster	Dato base
	r_pendiente_may15.tif	raster	Dato estandarizado
aptitud agrícola	Ap_agricultura.tif	raster	Resultado de la evaluación

aptitud agrícola clasificado	Ap_agricultura_clases.tif	raster	Resultado de la evaluación categorizado
------------------------------	---------------------------	--------	---

Los datos vectoriales están disponibles en la base de datos sqlite **sadeANTA.sqlite**, se puede descargar desde http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/ y los datos raster se encuentran accesibles desde el link http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/cau_agricola/

Tabla A13. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida de uso aprovechamiento forestal del bosque nativo.

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
F1- Cobertura del suelo	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	z_lccs_apforestal.tif	raster	Dato estandarizado
F2- Productividad primaria neta	ppn.tif	raster	Dato calculado
	z_ppn.tif	raster	Dato estandarizado
F3- Altitud	altitud.tif	raster	Dato base
	z_altitud_apforestal.tif	raster	Dato estandarizado
F4- Pendiente	pendiente.tif	raster	Dato base
	z_pendiente_apforestal.tif	raster	Dato estandarizado
F5- Accesibilidad a centros poblados	población_cnpyv_2010	vectorial punto	Dato base
	red_vial	vectorial línea	Dato base
	accesibilidad_centros_poblados.tif	raster	Dato calculado
	z_accesibilidad_centros_poblados.tif	raster	Dato estandarizado
R1- Áreas naturales protegidas	areas_protegidas	vectorial polígono	Dato base
	r_areas_protegidas.tif	raster	Dato estandarizado
R2- Márgenes de cursos de agua	cursos_agua	vectorial línea	Dato base
	cursos_agua_buffer_300m	vectorial polígono	Dato calculado
	r_cursos_agua_buf_300m.tif	raster	Dato estandarizado
R3- Ejidos urbanos	ejidos_urbanos	vectorial polígono	Dato base

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
	r_ejidos_urbanos.tif	raster	Dato estandarizado
R4- Áreas no forestales	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	r_noapforestal.tif	raster	Dato estandarizado
aptitud para aprovechamiento forestal	Ap_apforestal.tif	raster	Resultado de la evaluación
aptitud para aprovechamiento forestal clasificado	Ap_apforestal_clases.tif	raster	Resultado de la evaluación categorizado

Los datos vectoriales están disponibles en la base de datos sqlite **sadeANTA.sqlite**, se puede descargar desde http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/ y los datos raster se encuentran accesibles desde el link http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/cau_apforestal/

Tabla A14. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida para el Ecoturismo.

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
F1- Heterogeneidad del paisaje	heterogeneidad.tif	raster	Dato base
	z_heterogeneidad.tif	raster	Dato estandarizado
F2- Cobertura del suelo	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	z_lccs_ecoturismo.tif	raster	Dato estandarizado
F3- Distancia a áreas especiales	areas_protegidas	vectorial polígono	Dato base
	areas_protegidas_buffer_2Km	vectorial polígono	Dato calculado
	cursos_agua	vectorial línea	Dato base
	cursos_agua_buffer_300m	vectorial polígono	Dato calculado
	areas_protegidas_cursos_agua_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_areas_protegidas_cursos_agua_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F4- Altitud	altitud.tif	raster	Dato base
	z_altitud_ecoturismo.tif	raster	Dato estandarizado
F5- Pendiente	pendiente.tif	raster	Dato base
	z_pendiente_ecoturismo.tif	raster	Dato estandarizado

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
F6- Proximidad a lugares históricos y sitios culturales	lugares_historicos_sitios_culturales	vectorial punto	Dato base
	lugares_historicos_sitios_culturales_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_lugares_historicos_sitios_culturales_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F7- Efecto de red vial	red_vial	vectorial línea	Dato base
	caminos_distancia.tif	raster	Dato calculado
	rutas_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_redvial_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F8- Distancia desde centros poblados	población_cnpyv_2010	vectorial punto	Dato base
	localidades_grandes_distancia.tif	raster	Dato calculado
	localidades_medianas_distancia.tif	raster	Dato calculado
	localidades_pequenas_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_centros_poblados_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
R1- Ejidos urbanos	ejidos_urbanos	vectorial polígono	Dato base
	r_ejidos_urbanos.tif	raster	Dato estandarizado
aptitud para ecoturismo	Ap_ecoturismo.tif	raster	Resultado de la evaluación
aptitud para ecoturismo clasificado	Ap_ecoturismo_clases.tif	raster	Resultado de la evaluación categorizado

Los datos vectoriales están disponibles en la base de datos sqlite **sadeANTA.sqlite**, se puede descargar desde http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/ y los datos raster se encuentran accesibles desde el link http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/cau_ecoturismo/

Tabla A15. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida para la Conservación.

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
F1- Heterogeneidad del paisaje	heterogeneidad.tif	raster	Dato base
	z_heterogeneidad.tif	raster	Dato estandarizado
F2- Cobertura del suelo	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	z_lccs_conserva.tif	raster	Dato estandarizado
F3- Tamaño de parches	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	tama_parche.tif	raster	Dato calculado
	z_tama_parche.tif	raster	Dato estandarizado
F4- Distancia al vecino más próximo	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	dist_vec_prox.tif	raster	Dato calculado
	z_dist_vec_prox.tif	raster	Dato estandarizado
F5- Distancia a cuerpos y cursos de agua	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	cuerpos_agua_areas_reg_inun_distancia.tif	raster	Dato calculado
	cursos_agua	vectorial línea	Dato base
	cursos_agua_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_cuerpos_cursos_agua_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F6- Efecto de canales	canales	vectorial línea	Dato base
	canales_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_canales_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F7- Efecto de red vial	red_vial	vectorial línea	Dato base
	caminos_distancia.tif	raster	Dato calculado
	rutas_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_redvial_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F8- Distancia desde centros poblados	población_cnpyv_2010	vectorial punto	Dato base
	localidades_grandes_distancia.tif	raster	Dato calculado
	localidades_medianas_distancia.tif	raster	Dato calculado

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
	localidades_pequenas_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_centros_poblados_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
	localidades_pequenas_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_centros_poblados_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F9- Alteración peridoméstica	peridomesticos	vectorial punto	
	peridomesticos_distancia.tif		
	z_peridomesticos_distancia.tif		
F10- Densidad de limites catastrales	parcelario	vectorial polígono	Dato base
	densidad_bordes_parcel.tif	raster	Dato calculado
	z_densidad_bordes_parcel.tif	raster	Dato estandarizado
F11- Pendiente	pendiente.tif	raster	Dato base
	z_pendiente_conser.tif	raster	Dato estandarizado
R1- Áreas naturales protegidas	areas_protegidas	vectorial polígono	Dato base
	r_areas_protegidas.tif	raster	Dato estandarizado
R2- Ejidos urbanos	ejidos_urbanos	vectorial polígono	Dato base
	r_ejidos_urbanos.tif	raster	Dato estandarizado
Aptitud para conservación	Ap_conservacion.tif	raster	Resultado de la evaluación
aptitud para conservación clasificado	Ap_conservacion_clases.tif	raster	Resultado de la evaluación categorizado

Los datos vectoriales están disponibles en la base de datos sqlite **sadeANTA.sqlite**, se puede descargar desde http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/ y los datos raster se encuentran accesibles desde el link http://geointa.inta.gov.ar/files_santiago/anta/cau_conservacion/

Tabla A16. Datos geográficos utilizados en la evaluación de capacidad de acogida para la Ganadería extensiva.

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
F1- Cobertura del suelo	lccs_n3	vectorial polígono	Dato base
	z_lccs_ganaderia.tif	raster	Dato estandarizado
F2- Áreas de sobreuso	uso_suelo	vectorial polígono	Dato base
	IProduct.tif	raster	Dato base
	IP_uso_suelo_centroid	vectorial punto	Dato calculado
	z_sobreuso	raster	Dato estandarizado
F3- Distancia a cuerpos de agua y cursos de agua	cuerpos_agua	vectorial polígono	Dato base
	cursos_agua	vectorial línea	Dato base
	cuerpos_agua_distancia.tif	raster	Dato calculado
	cursos_agua_distancia.tif	raster	Dato calculado
	z_cuerpos_cursos_agua_distancia.tif	raster	Dato estandarizado
F4- Precipitación media anual	pp_media_anual.tif	raster	Dato base
	z_pp_media_anual.tif	raster	Dato estandarizado
F5- Temperatura media anual	temp_media_anual.tif	raster	Dato base
	z_temp_media_anual.tif	raster	Dato calculado
F6- Tamaño de parcelas	parcelario	vectorial polígono	Dato base
	tama_propiedades.tif	raster	Dato base
	z_tama_propiedades.tif	raster	Dato estandarizado
F7- Pendiente	pendiente.tif	raster	Dato base
	z_pendiente_ganaderia.tif	raster	Dato estandarizado
F8- Accesibilidad a centros poblados	población_cnpv_2010	vectorial punto	Dato base
	red_vial	vectorial línea	Dato base
	accesibilidad_centros_poblados.tif	raster	Dato calculado
	z_accesibilidad_centros_poblados.tif	raster	Dato estandarizado
	z_pendiente_conser.tif	raster	Dato estandarizado
R1- Áreas naturales protegidas	areas_protegidas	vectorial polígono	Dato base

Capa	Nombre	Tipo	Proceso
	r_areas_protegidas.tif	raster	Dato estandarizado
R2- Márgenes de cursos de agua	cursos_agua	vectorial línea	Dato base
	cursos_agua_buffer_300m	vectorial polígono	Dato calculado
	r_cursos_agua_buf_300m.tif	raster	Dato estandarizado
R3- Ejidos urbanos	ejidos_urbanos	vectorial polígono	Dato base
	r_ejidos_urbanos.tif	raster	Dato estandarizado
R4- Cuerpos de agua	cuerpos_agua	vectorial polígono	Dato base
	r_cuerpos_agua.tif	raster	Dato estandarizado
aptitud para ganadería	Ap_ganaderia.tif	raster	Resultado de la evaluación
aptitud para ganadería clasificado	Ap_ganaderia_clases.tif	raster	Resultado de la evaluación categorizado

Descripción del SADEOT

El Plugin SADEOT se puede ejecutar como complemento de QGIS (Figura B1). Las diferentes pestañas de su interfaz permiten automatizar los procesos descritos en la tesis.

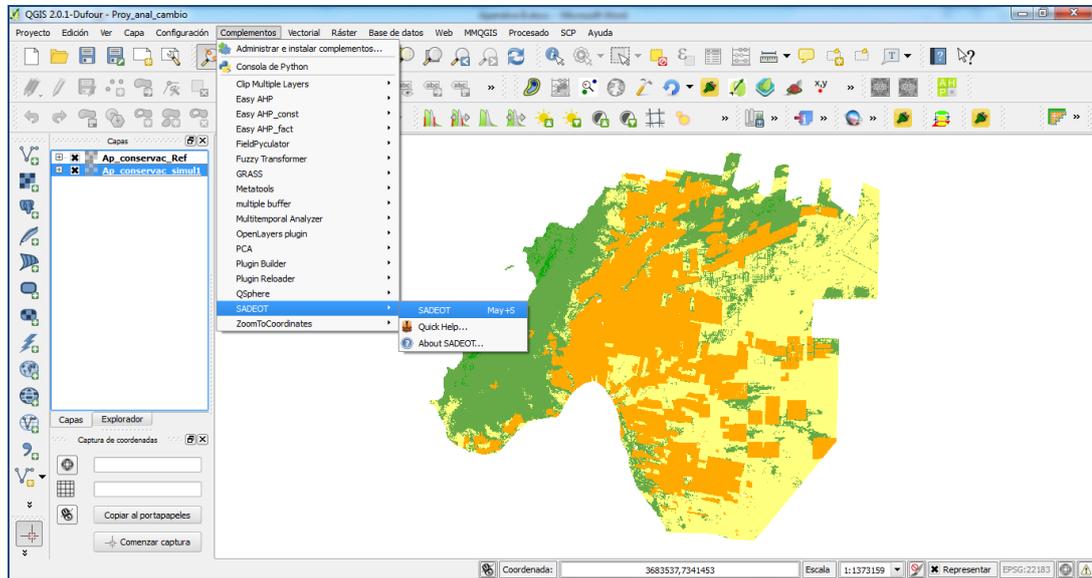


Figura B1. Interfaz de QGIS para ejecutar el Plugin SADEOT

A continuación se ilustran las funcionalidades incorporadas.

- a) **Zonificación bioclimática:** permite obtener una zonificación a partir de variables bioclimáticas mediante la realización de los Análisis de Componentes Principales y Análisis Cluster (Figuras B2, B3).

Requiere como entradas:

- un archivo de texto delimitado por coma con los datos asociados a la grilla que cubre el área de estudio (latitud, longitud de los centroides de las celdas y variables bioclimáticas),
- el tamaño de las celdas de la grilla,
- el número de clases que se quieren obtener.

Se obtienen como resultados:

- el raster de regiones bioclimáticas,
- estadísticos derivados del Análisis de Componentes Principales y del Análisis Cluster.

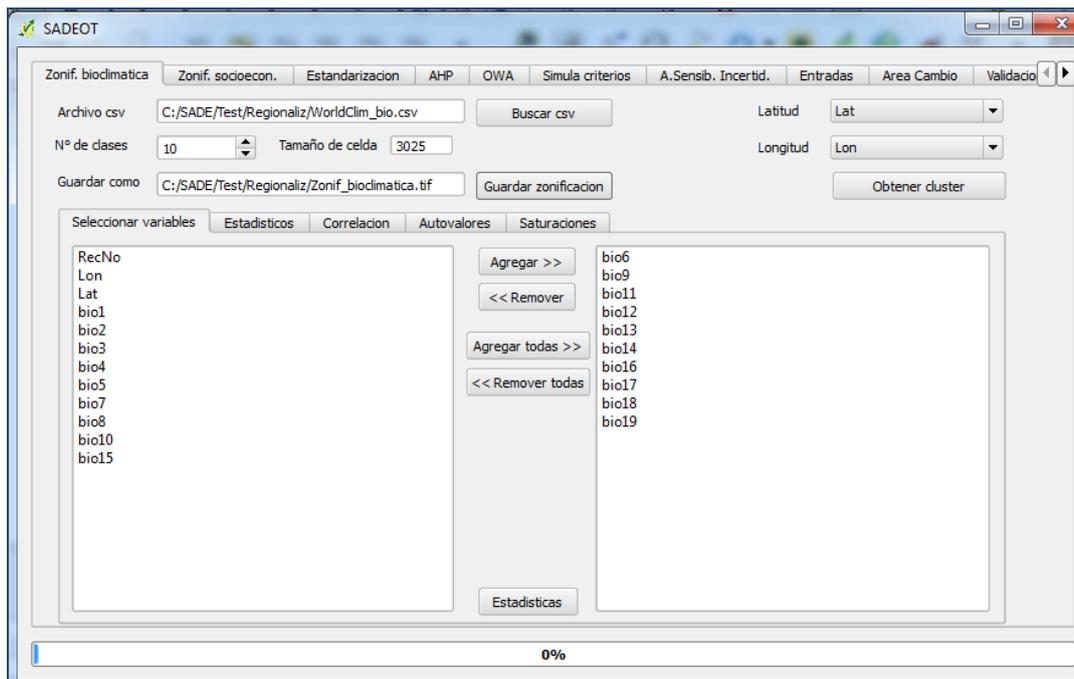


Figura B2. Interfaz del proceso de zonificación bioclimática.

Seleccionar variables							Seleccionar variables										
Estadísticos							Estadísticos										
Correlacion							Correlacion										
Autovalores							Autovalores										
Saturaciones							Saturaciones										
	variable	mini	maxi	media	desvioest	coefvariac		bio6	bio9	bio11	bio12	bio13	bio14	bio16	bio17	bio18	bio19
1	bio6	-19.9	9.9	1.77	6.6	372.88	bio6	1	0.988	0.99	0.872	0.835	0.515	0.843	0.593	0.843	0.597
2	bio9	-9.38	19.93	10.96	5.78	52.74	bio9	0.988	1	0.992	0.87	0.842	0.488	0.849	0.568	0.849	0.573
3	bio11	-12.45	18.03	10.35	6.26	60.48	bio11	0.99	0.992	1	0.873	0.848	0.492	0.854	0.571	0.853	0.57
4	bio12	27	1240	475.27	288.23	60.65	bio12	0.872	0.87	0.873	1	0.967	0.639	0.976	0.716	0.975	0.699
5	bio13	8	243	94.55	50.57	53.48	bio13	0.835	0.842	0.848	0.967	1	0.475	0.998	0.544	0.997	0.523
6	bio14	0	32	3.95	4.01	101.52	bio14	0.515	0.488	0.492	0.639	0.475	1	0.494	0.975	0.484	0.938
7	bio16	17	670	254.02	140.9	55.47	bio16	0.843	0.849	0.854	0.976	0.998	0.494	1	0.567	0.999	0.548
8	bio17	0	107	16.65	14.91	89.55	bio17	0.593	0.568	0.571	0.716	0.544	0.975	0.567	1	0.559	0.976
9	bio18	16	670	251.63	139.69	55.51	bio18	0.843	0.849	0.853	0.975	0.997	0.484	0.999	0.559	1	0.539
10	bio19	0	109	18.34	15.31	83.48	bio19	0.597	0.573	0.57	0.699	0.523	0.938	0.548	0.976	0.539	1

Seleccionar variables				Seleccionar variables			
Estadísticos				Estadísticos			
Correlacion				Correlacion			
Autovalores				Autovalores			
Saturaciones				Saturaciones			
	autovalor	porc_variab	porc_variab_acum		Factor1	Factor2	Factor3
Factor1	7.81	78.1	78.1	bio6	0.495	0.296	0.813
Factor2	1.61	16.1	94.2	bio9	0.51	0.265	0.815
Factor3	0.48	4.8	99	bio11	0.518	0.265	0.81
				bio12	0.785	0.434	0.436
				bio13	0.882	0.233	0.406
				bio14	0.21	0.95	0.158
				bio16	0.874	0.258	0.411
				bio17	0.267	0.933	0.228
				bio18	0.876	0.247	0.413
				bio19	0.234	0.921	0.258

Figura B3. Estadísticos derivados del Análisis de Componentes Principales y del Análisis Cluster.

- b) **Zonificación socioeconómica:** permite obtener una zonificación a partir de variables socioeconómicas mediante el proceso de análisis de encadenamiento (linkage analysis), Figuras B4, B5.

Requiere como entradas:

- un archivo de texto delimitado por coma con los datos socio- económicos asociados a las unidades de análisis,
- un shape de las unidades espaciales consideradas,
- un campo común entre el archivo de texto y el archivo shape que permita unir los resultados de la zonificación a las unidades espaciales.

Se obtienen como resultados:

- un shape de regiones socio-económicas obtenidas a partir del análisis de encadenamiento,
- valores medios de las variables para cada región.

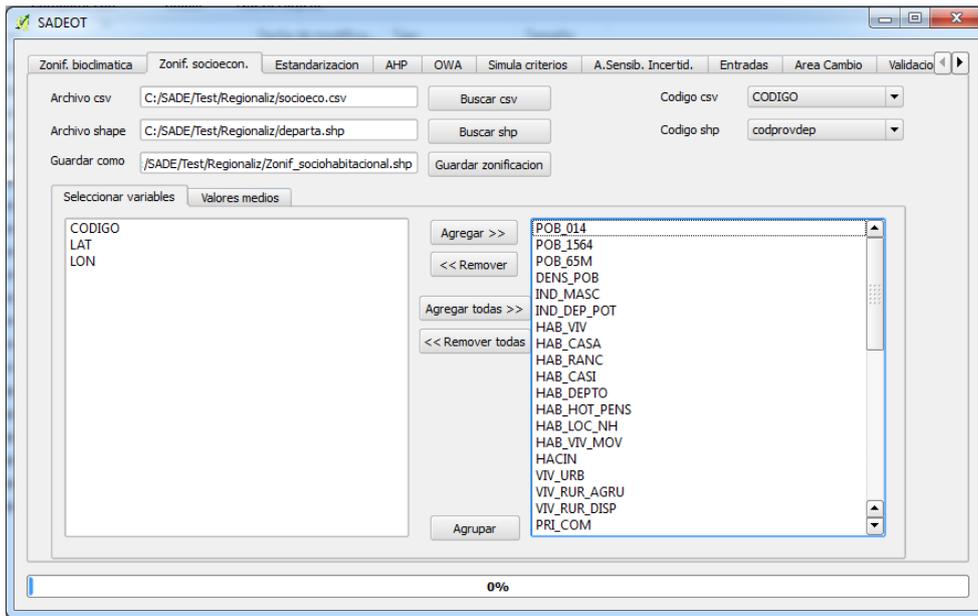


Figura B4. Interfaz del proceso de zonificación socio-económica.

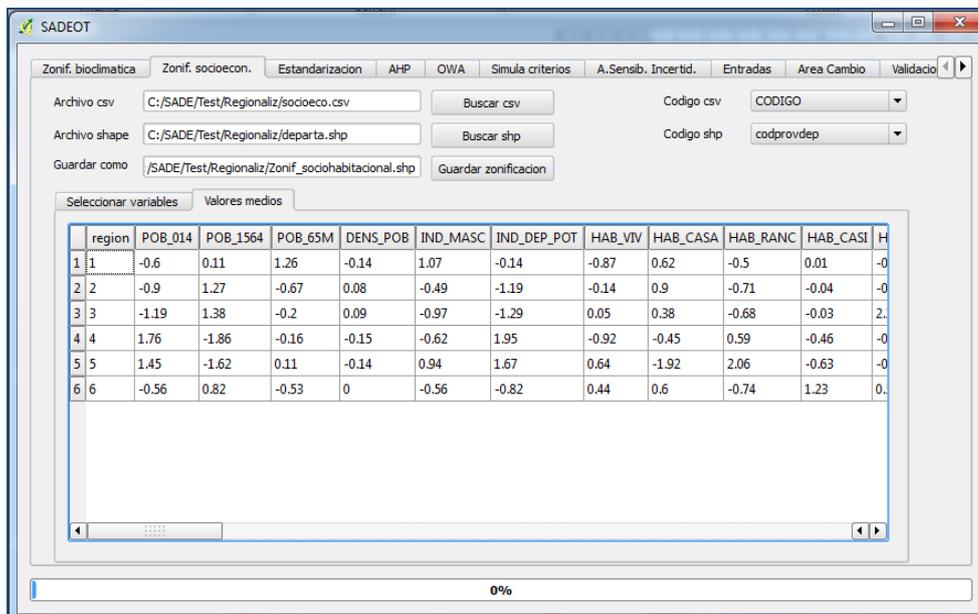


Figura B5. Valores medios de las variables socio- económicas consideradas.

- c) **Estandarización simple:** permite asociar a cada categoría un valor entre 0 y 1 de acuerdo a su aptitud para un uso determinado, posteriormente genera el archivo

raster utilizando los centroides de la grilla que cubre el área de estudio, el límite del área y el tamaño de la celda (Figura B6):

Requiere como entradas:

- un shape de la capa a estandarizar,
- el atributo de la capa que contiene las categorías que se deben puntuar,
- los valores que se asignarán a los distintas categorías,
- el nombre del campo o atributo que contendrá los valores asignados,
- un shape de centroides de la grilla, límite del área de estudio y tamaño de las celdas de la grilla.

Se obtiene como resultado:

- el raster con los valores asignados a través de la estandarización simple.

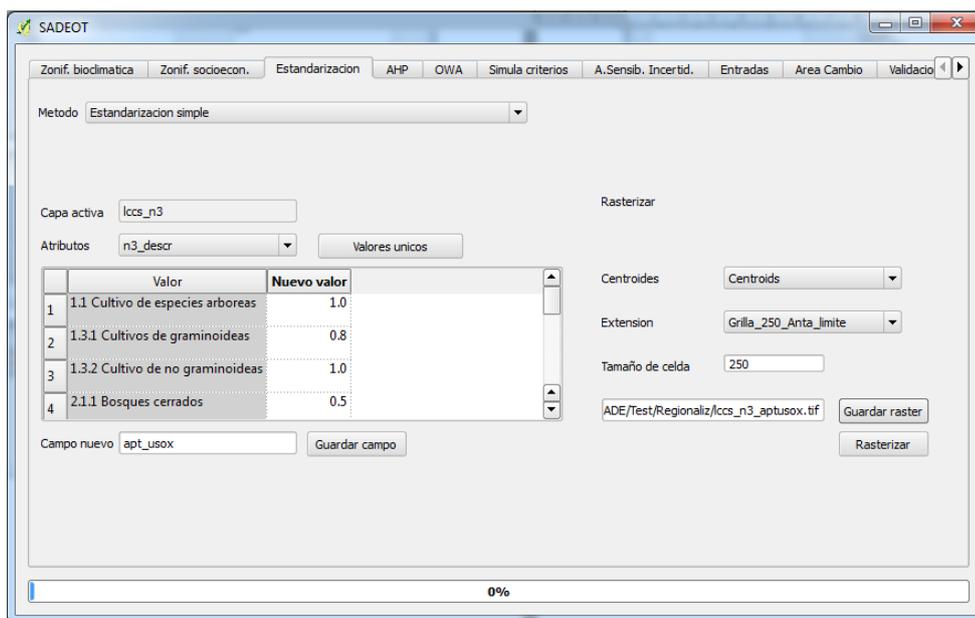


Figura B6. Interfaz del proceso de estandarización simple.

d) **Estandarización basada en funciones de pertenencia difusas:** permite re-escalar los valores de un raster de entrada mediante funciones lineales, sigmoideas y en forma de J definidas a partir de puntos de control A, B, C y D (Figura B7):

Requiere como entradas:

- un raster con los valores de la variable,
- la función de pertenencia a utilizar,
- los valores de los puntos de control.

Se obtiene como resultado:

- el raster con los valores re-escalados mediante la estandarización difusa.

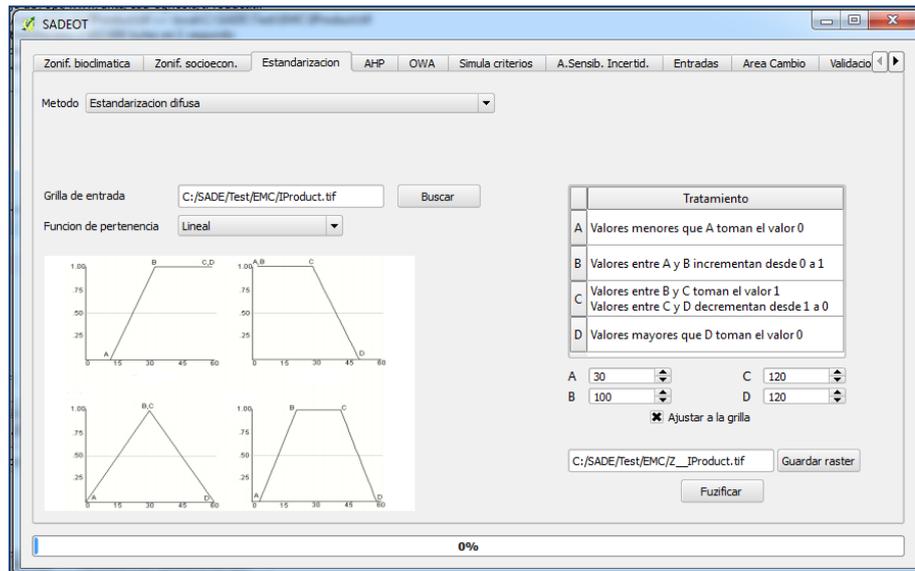


Figura B7. Interfaz del proceso de estandarización difusa.

e) **Evaluación multicriterio mediante combinación lineal ponderada:** permite evaluar la capacidad de acogida para un uso considerando factores y restricciones, calcula los pesos a través del proceso de jerarquías analíticas (Analytical Hierarchy Process, AHP) y obtiene un mapa de aptitud.

Requiere como entradas:

- los raster de los factores estandarizados (Figura B8),
- la matriz de comparación por pares (Figura B9),
- los raster de las restricciones (Figura B10).

Se obtiene como resultado:

- el raster de capacidad de acogida para el uso considerado.

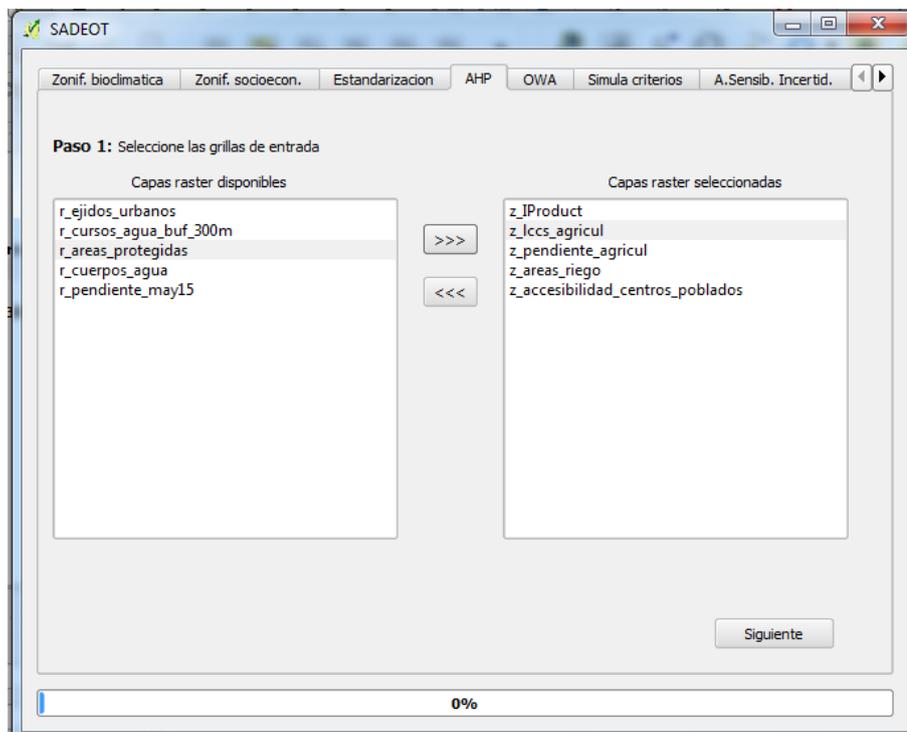


Figura B8: Selección de los factores estandarizados.

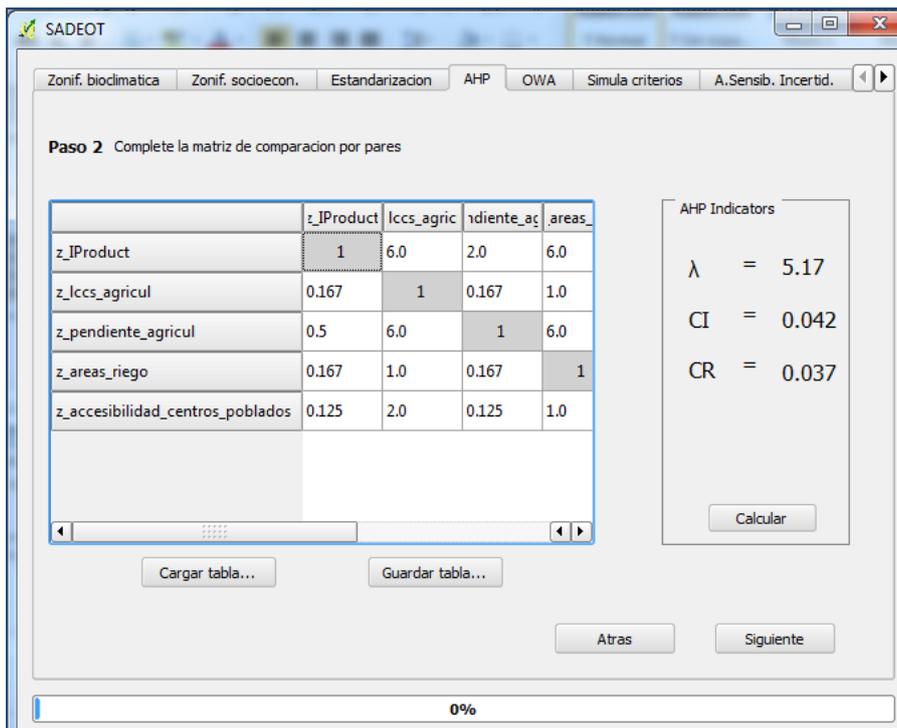


Figura B9: Interfaz de carga de matriz de comparación por pares y cálculo de indicadores de consistencia.

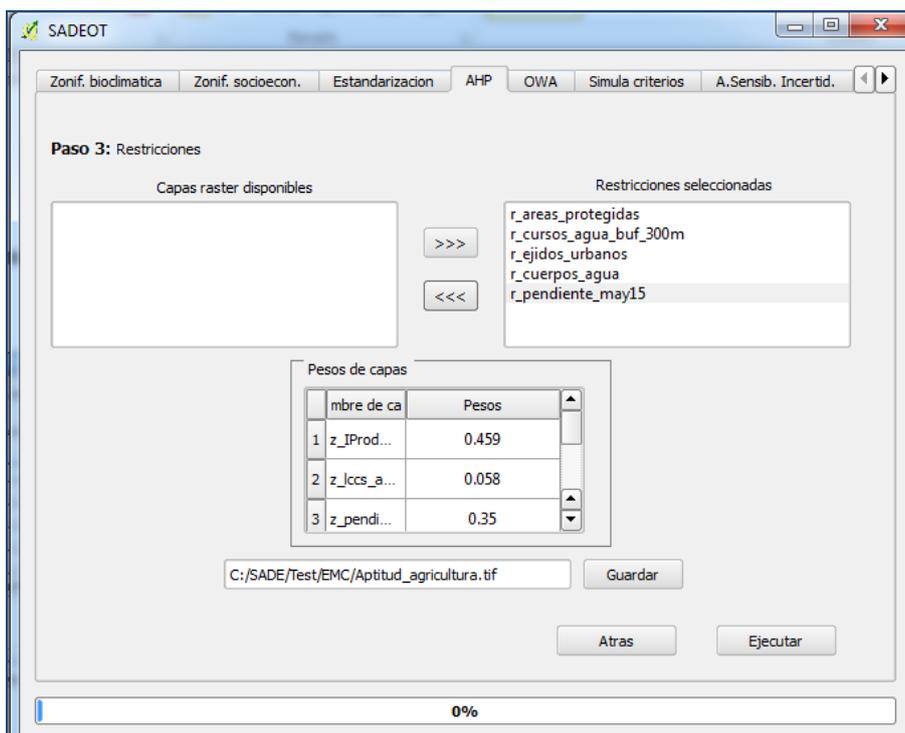


Figura B10. Selección de las restricciones.

- f) **Evaluación multicriterio mediante promedio ponderado ordenado:** permite evaluar la aptitud para un uso considerando factores y restricciones, ingresando los pesos y utilizando diferentes estrategias de decisión, desde la extremadamente optimista a la extremadamente pesimista.

Requiere como entradas:

- los raster de los factores estandarizados (Figura B11),
- los raster de las restricciones (Figura B12)
- los pesos de los factores (Figura B13)

Se obtiene como resultado:

- los raster de capacidad de acogida para el uso considerado, variando las estrategias de decisión.

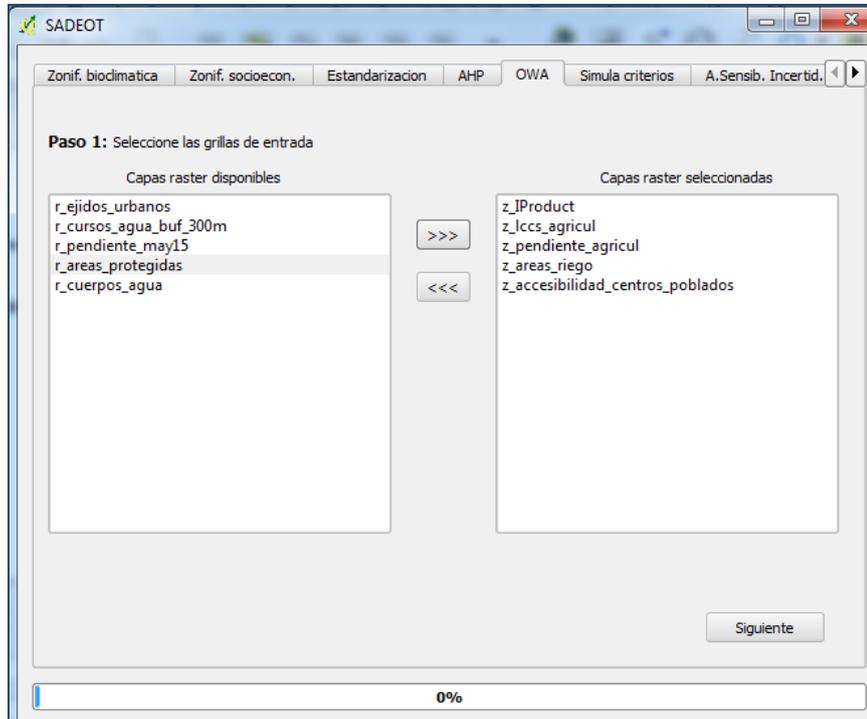


Figura B11: Selección de los factores estandarizados.

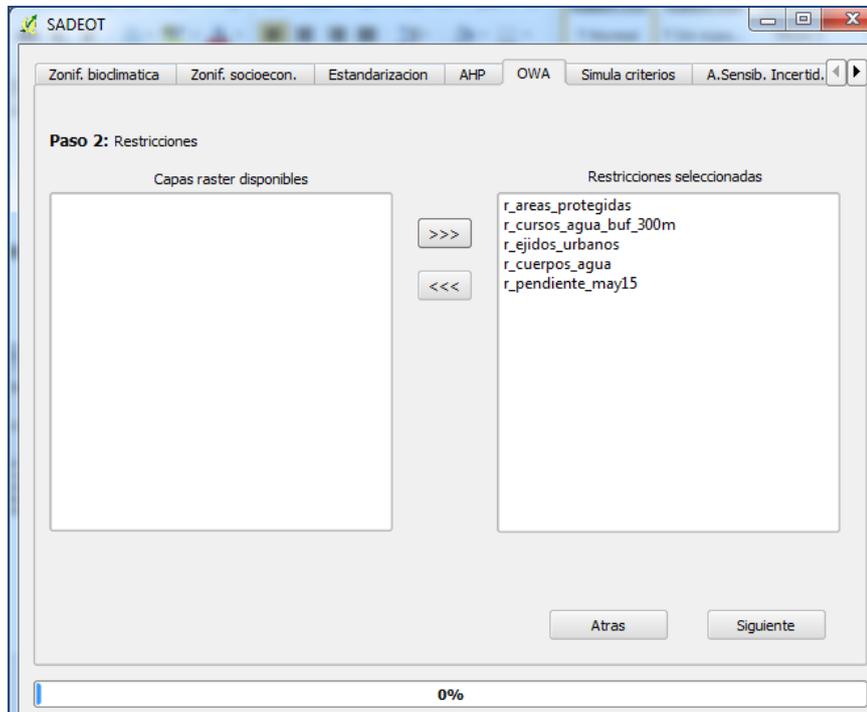


Figura B12. Selección de las restricciones.

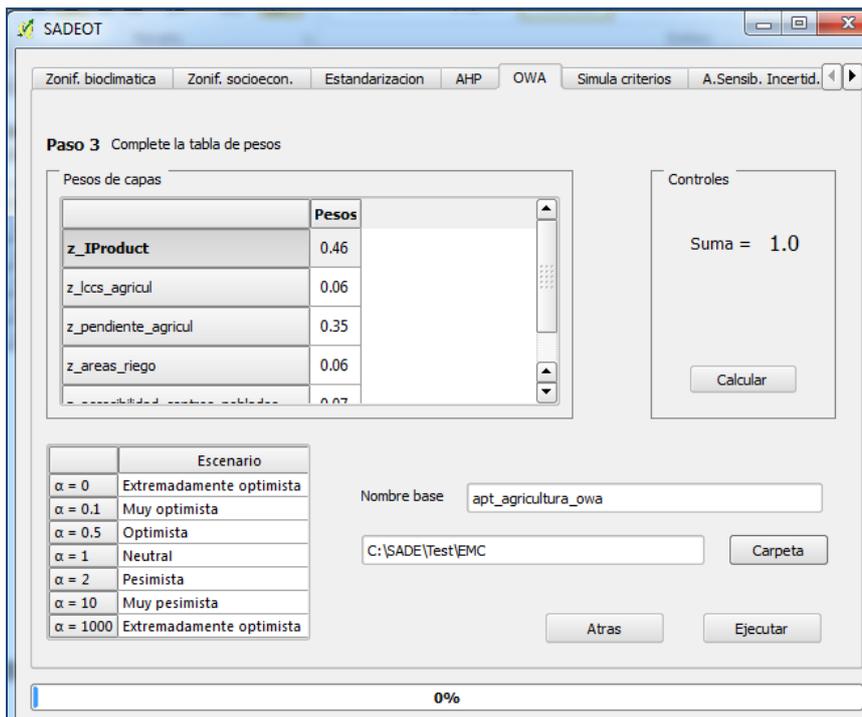


Figura B13: Interfaz de carga de los pesos.

- g) **Evaluación multicriterio variando la cantidad de criterios considerados:** permite evaluar la aptitud para un uso mediante la eliminación sucesiva de factores, recalculando los pesos mediante el método de AHP.

Requiere como entradas:

- los raster de los factores estandarizados (Figura B14),
- la matriz de comparación por pares, con la opción de seleccionar los factores a considerar (Figura B15),
- los raster de las restricciones (Figura B16)

Se obtiene como resultado:

- los raster de capacidad de acogida para el uso evaluado, para cada subconjunto de criterios seleccionados.

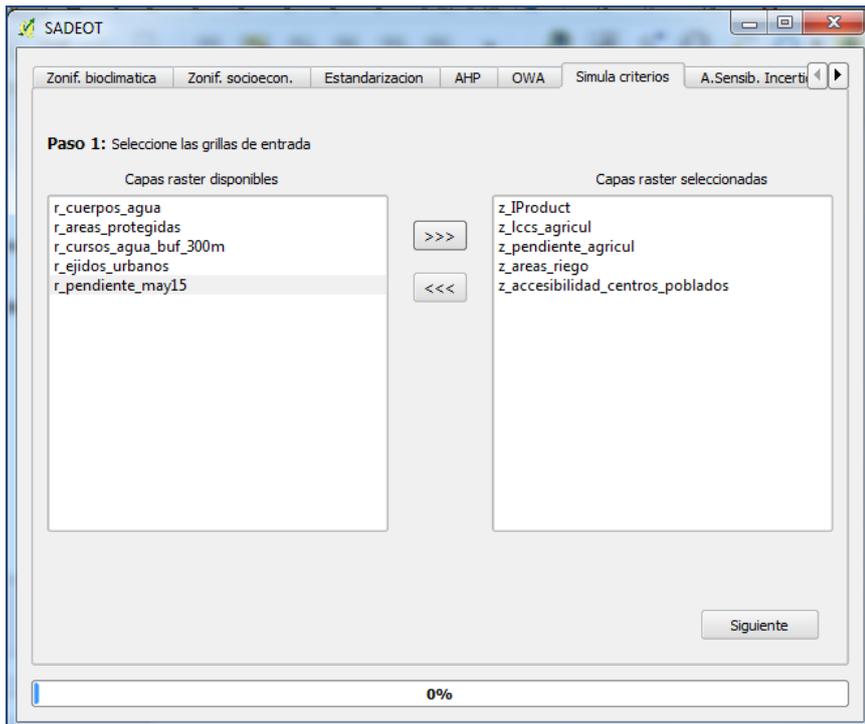


Figura B14. Selección de los factores estandarizados.

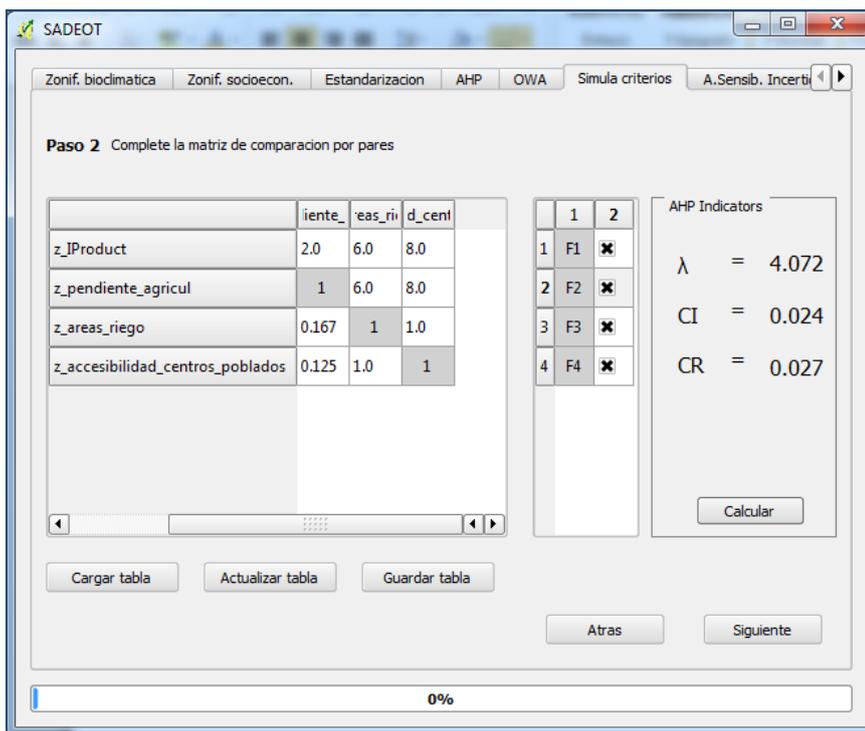


Figura B15. Interfaz de carga de la matriz de comparación por pares, cuadro de selección de factores.

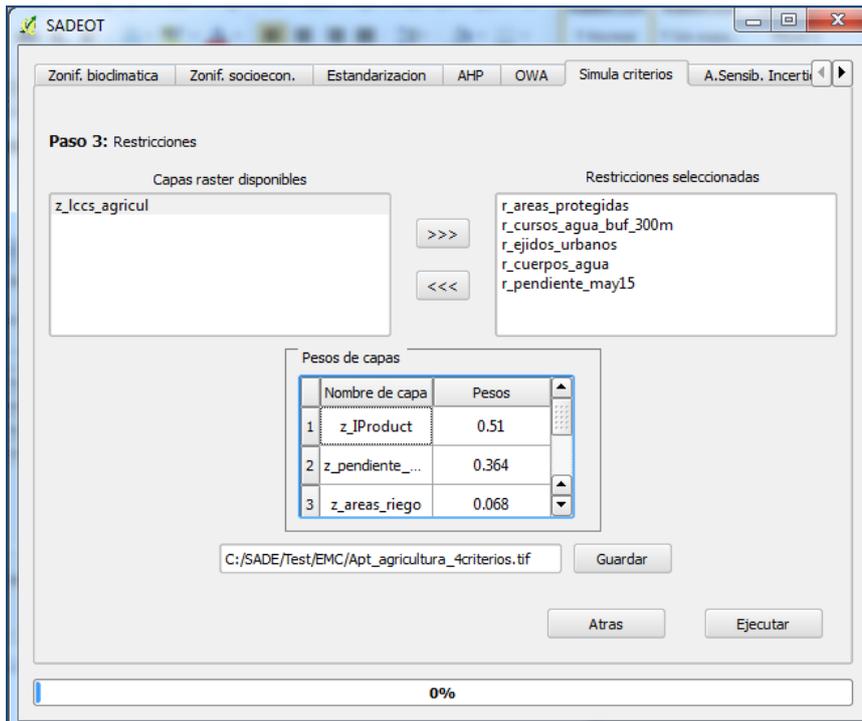


Figura B16. Selección de las restricciones.

- h) **Análisis de sensibilidad e incertidumbre:** permite evaluar la robustez de los modelos de capacidad de acogida para los usos considerados a las variaciones en los pesos, obteniendo un mapa de aptitud promedio, un mapa de incertidumbre e índices de sensibilidad.

Requiere como entradas:

- los raster de los factores estandarizados (Figura B17),
- los raster de las restricciones (Figura B18)
- El número N, que especifica el tamaño de las 2 listas de muestras de pesos asociados a los factores, a partir de las cuales se generan R muestras de pesos, donde $R = (K+2) \times N$, siendo K el número de factores. El modelo de capacidad de acogida de uso se ejecuta R veces.

Se obtiene como resultado:

- Mapa de aptitud promedio, mapa de desvío estándar, índices de sensibilidad total e índices de sensibilidad de primer orden.

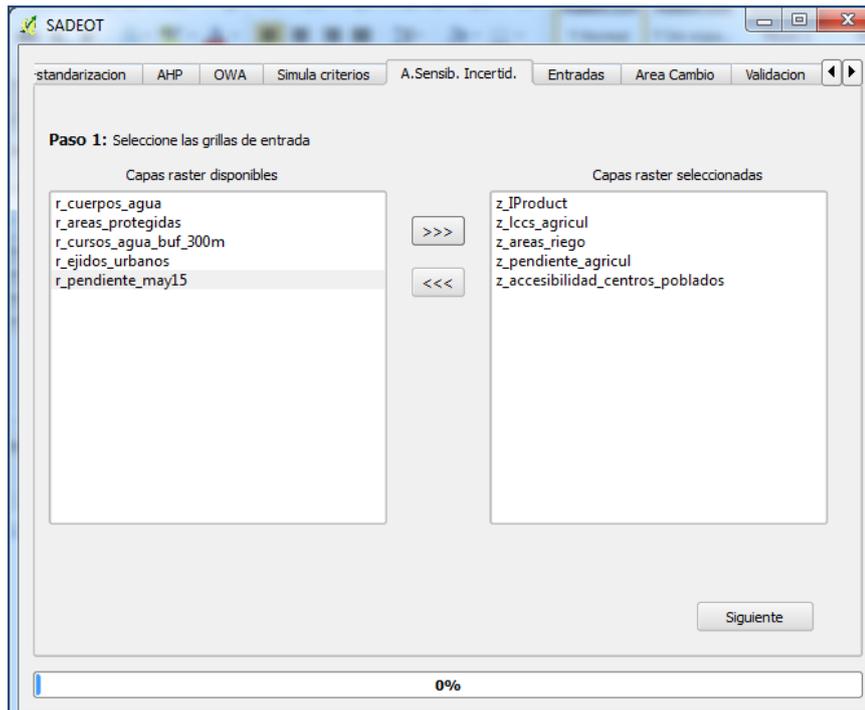


Figura B17. Selección de los factores estandarizados.

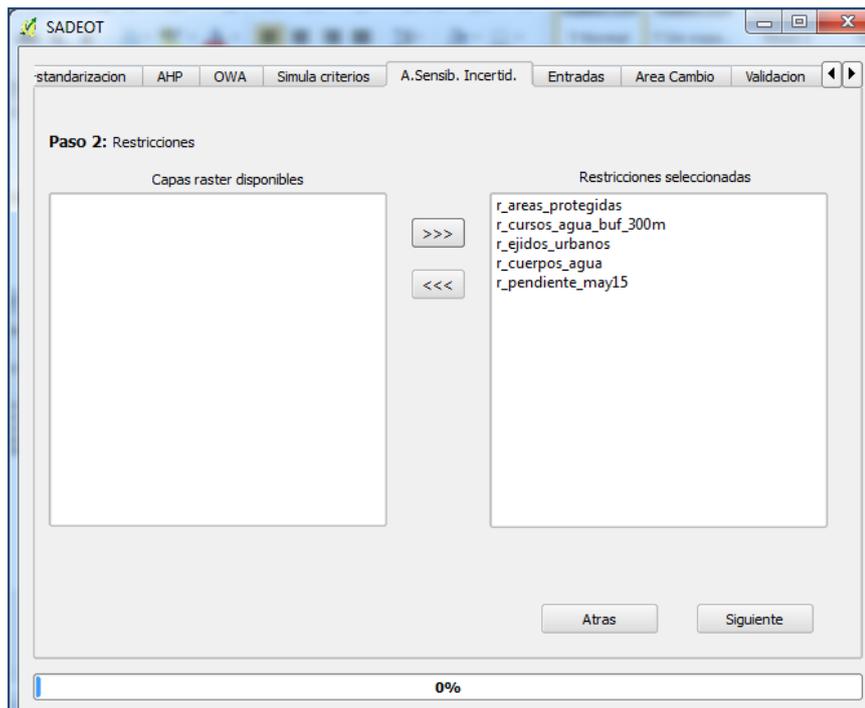


Figura B18. Selección de las restricciones.

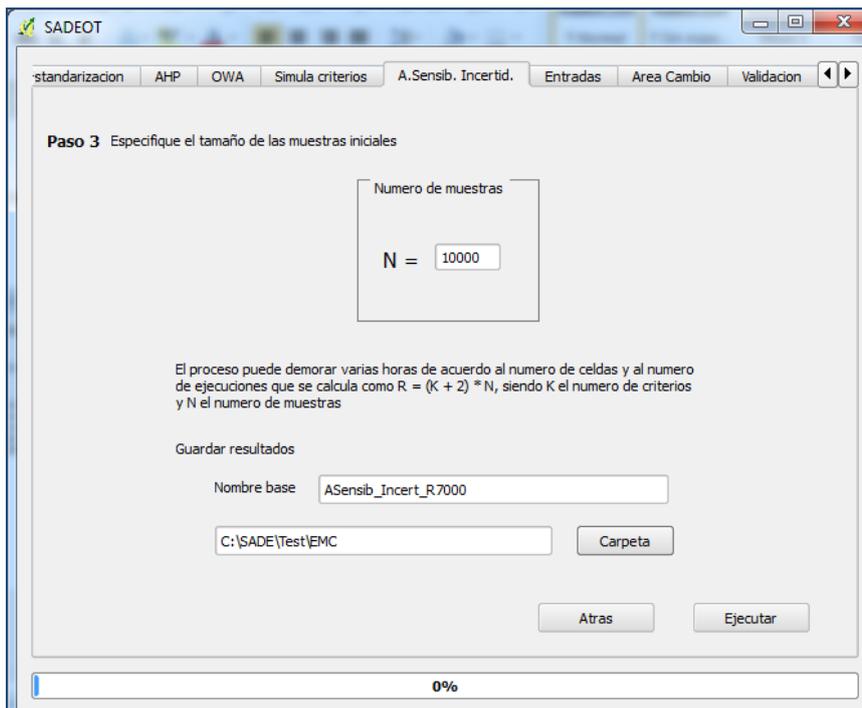


Figura B19. Especificación del número de muestras.

- i) **Especificación de las entradas:** permite introducir los raster de capacidad de acogida de uso clasificados en 4 clases de aptitud: tierras altamente aptas (S1), moderadamente aptas (S2), marginalmente aptas (S3) y no aptas (N), a partir de los cuales se cuantificarán los cambios.

Requiere como entrada:

- los raster de capacidad de acogida de uso clasificados (Figura B20),

Se obtiene como resultado:

- la verificación de la geometría y del tipo de valores contenidos en el raster.

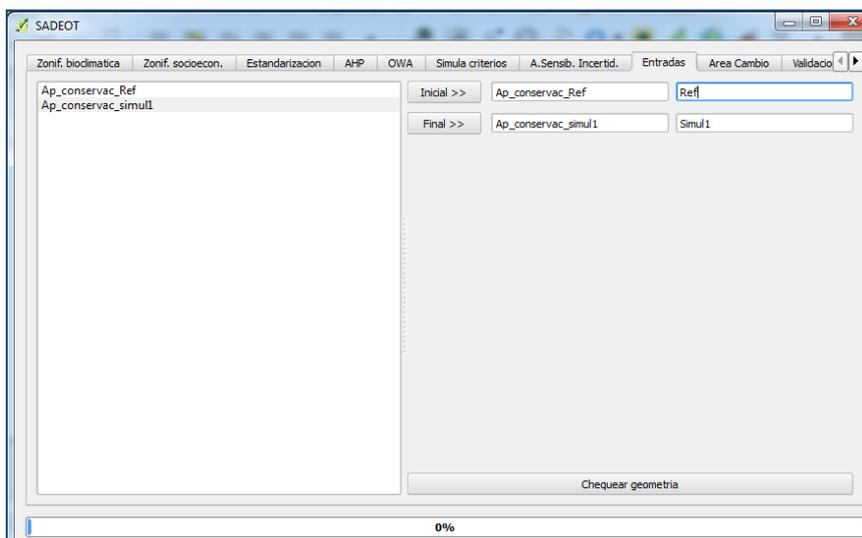


Figura B20. Especificación de los raster a partir de los cuales se cuantificarán los cambios.

- j) **Area de cambio:** Permite cuantificar los cambios entre un raster de capacidad de acogida de uso establecido como referencia y un raster simulado a partir de variaciones de cantidad de criterios, método de EMC o ponderaciones de decisores.

Requiere como entrada:

- los raster de capacidad de acogida de uso clasificados (Figura B21),

Se obtiene como resultado:

- la superficie y la variación (ha, unidades raster o Km²) de cada clase, con sus respectivos porcentajes.

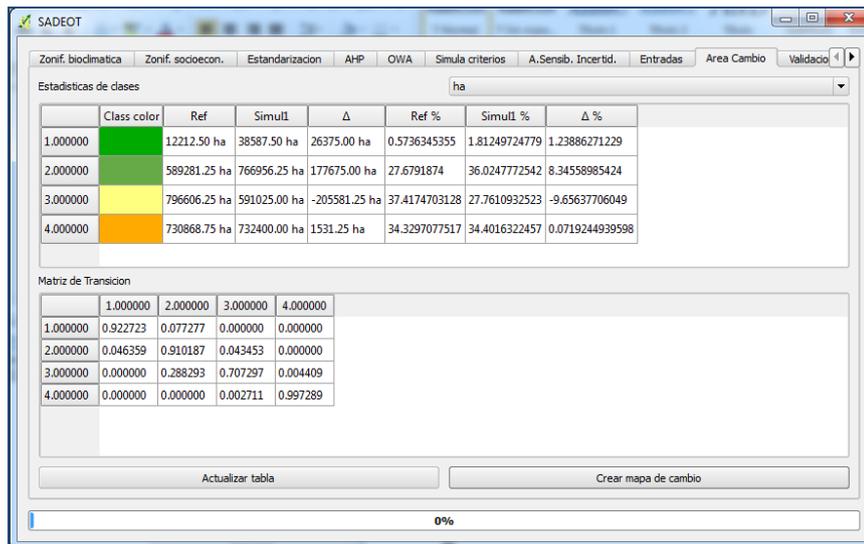


Figura B21. Cuantificación de cambios entre mapas de capacidad de acogida de uso.

- k) **Validación:** permite calcular el porcentaje de exactitud y el coeficiente Kappa, para cuantificar los cambios entre un mapa de referencia y un mapa simulado.

Requiere como entrada:

- los raster de capacidad de acogida de uso, clasificados (mapa de referencia y mapa simulado), Figura B22.

Se obtiene como resultado:

- el porcentaje de exactitud y el coeficiente kappa.

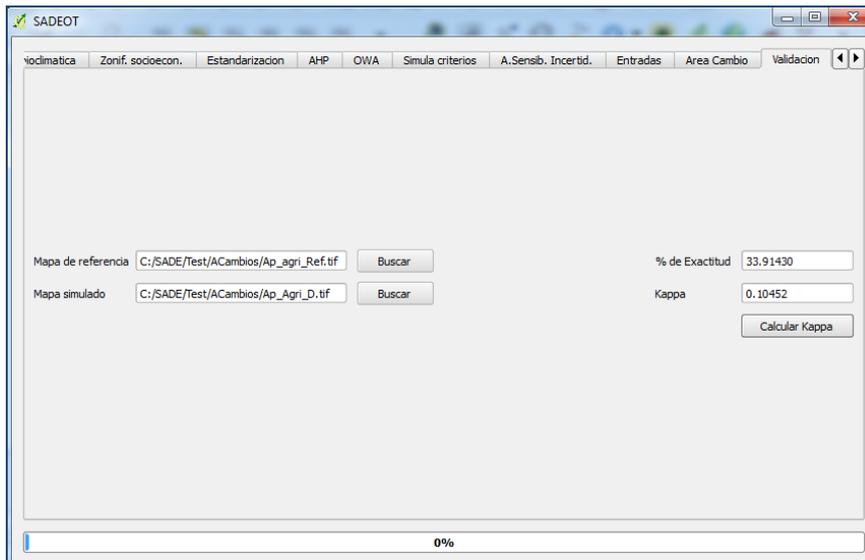


Figura B22. Interfaz de cálculo de porcentajes de exactitud y coeficiente Kappa.