



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**INSTITUTO DE ECOLOGÍA
MANEJO INTEGRAL DE ECOSISTEMAS**

Construcción de un modelo predictivo para el comportamiento de cambio de uso de suelo en la región de Chamela-Cuixmala, en la costa de Jalisco, utilizando programación genética y autómatas celulares.

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

PRESENTA:

EVERARDO GUSTAVO ROBREDO ESQUIVELZETA

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. Pablo Padilla Longoria, Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, U.N.A.M.

COMITÉ TUTOR:

Dra. María del Consuelo Bonfil Sanders, Facultad de Ciencias, U.N.A.M.

Dr. Mark Earl Olson, Instituto de Biología, U.N.A.M.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente

Me permito informar a usted, que el Subcomité de Ecología y Manejo Integral de Ecosistemas, en su sesión ordinaria del día 08 de abril de 2013, aprobó el jurado para la presentación de su examen para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del Posgrado en Ciencias Biológicas, del alumno **ROBREDO ESQUIVELZETA EVERARDO GUSTAVO** con número de cuenta **300547775** con la tesis titulada: **“CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PREDICTIVO PARA EL COMPORTAMIENTO DE CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA REGIÓN DE CHAMELA-CUIXMALA, EN LA COSTA DE JALISCO, UTILIZANDO PROGRAMACIÓN GENÉTICA Y AUTÓMATAS CELULARES”**, realizada bajo la dirección del **DR. PABLO PADILLA:**

Presidente: DR. LUIS ANTONIO BOJÓRQUEZ TAPIA
Vocal: DRA. ROSA IRMA TREJO VÁZQUEZ
Secretario: DR. MARK EARL OLSON
Suplente: DR. STEPHENS STEVENS CHRISTOPHER RHODES
Suplente: DRA. MARÍA DEL CONSUELO BONFIL SANDERS

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”
Cd. Universitaria, D.F., a 27 de mayo de 2013.

M. del Coro Arizmendi

DRA. MARÍA DEL CORO ARIZMENDI ARRIAGA
COORDINADORA DEL PROGRAMA

Agradecimientos

Agradezco al Posgrado en Ciencias Biológicas de la UNAM, por brindarme la oportunidad de estudiar la maestría y desarrollar el presente proyecto, al CONACYT, por el apoyo económico que recibí a través de su programa de becas de posgrado (CVU/REGISTRO: 329721/231023), al PAPIIT, del cual recibí el apoyo necesario para realizar el trabajo de campo a través del proyecto “Modelación espacial y manejo de recursos naturales en la región de Chamela-Cuixmala, en la costa de Jalisco“ (número de proyecto: IN229109), y a la Fundación Ecológica de Cuixmala, A.C., por facilitarme sus instalaciones y apoyarme en el reconocimiento de la región.

Así mismo, agradezco a mi tutor, el Dr. Pablo Padilla Longoria, y a mi Comité Tutor, integrado por la Dra. María del Consuelo Bonfil Sanders y el Dr. Mark Earl Olson, por sus comentarios, cooperación y calidez humana.

Agradecimientos personales

Agradezco profundamente a: mis padres por su apoyo y amor incondicional en todas las ocurrencias de mi vida; a mis amigos, que han contribuido enormemente a mi formación espiritual a lo largo de estos años (ustedes saben quienes son, nombrarlos es irrelevante); de entre ellos, agradezco especialmente a Cecilia, quien en pocos años pudo mostrarme todos los rostros del amor; a Álvaro Miranda, quien fue de gran ayuda en varias etapas del proyecto y me dio la oportunidad de conocer la hermosa selva de Chamela en más de una ocasión; y por último, agradezco al trabajador mexicano del campo y la ciudad, quien cada día sustenta sin saberlo la educación de nosotros, los estudiantes de las universidades públicas.

Everardo Gustavo Robredo Esquivelzeta

A mi querido pueblo mexicano y al gran espíritu del venado, quien rompió la ilusión de las fronteras del cuerpo y me regresó las esperanzas en la humanidad.

Índice general

1. Introducción.	1
1.1. Semblanza del proceso de devastación ambiental en México.	2
1.2. La situación de las selvas secas en nuestro país.	6
1.3. Breve historia ambiental de Chamela.	8
2. Objetivos	12
3. Antecedentes.	13
3.1. Sistemas de Información Geográfica de Fuente Abierta	15
3.2. Sistemas de Autómagas Geográficos	16
3.3. Redes Neuronales Artificiales y el Algoritmo de Retropropagación.	18
3.3.1. Separabilidad lineal y redes multicapa.	21
3.3.2. Entrenamiento de la red.	23
3.4. Algoritmos Genéticos	27
3.5. Multiescalaridad y sensibilidad a la forma.	30
4. Métodos.	35
4.1. Clasificación de coberturas	35
4.1.1. Preparación de las Imágenes	35
4.1.2. Clasificación	37
4.2. Una métrica morfológica combinada.	38

4.3. Implementación	42
4.3.1. Proceso de modelación	42
4.4. Métricas del paisaje	46
4.4.1. Composición y diversidad.	47
4.4.2. Conexidad.	47
4.4.3. Forma.	48
4.5. Variables de entrada.	49
4.6. Simulaciones.	54
5. Resultados.	59
5.1. Clasificación de coberturas.	59
5.2. Simulaciones.	64
6. Discusión y Conclusiones.	81
A. Manual de uso para el módulo <i>r.mgenerator</i>.	96
A.1. Instalación.	96
A.1.1. Instalación de FANN.	96
A.2. Uso de la aplicación.	98
A.2.1. Aplicación de Redes Neuronales Artificiales	99
A.3. Aplicación de algoritmo de operadores multigraduados.	104
A.4. Ejecución de simulaciones	108

Índice de figuras

1.1. Tendencias de cambio en la cobertura de la vegetación primaria por tipo de ecosistema. Tomado de [21].	5
1.2. Proyección de los procesos de cambio en la región bioclimática de las selvas subhúmedas del país. Tomado de [54].	8
1.3. Línea del tiempo ambiental de la región de Chamela - Cuixmala. Tomado de [20].	9
3.1. El perceptrón clásico. Tomado de [51].	20
3.2. Separabilidad lineal en dos dimensiones. La ecuación de la recta se define con la ecuación de activación del perceptrón.	22
3.3. Separación de conjuntos no linealmente separables en dos dimensiones: a) Ejemplo con dos conjuntos; b) Ejemplo con más de dos conjuntos.	22
3.4. Estructura que resuelve el problema planteado en el ejemplo. A. Unidades de asociación; B. Capa oculta; C. Capa de salida. La letra “w” indica pesos asociados, mientras que el símbolo \sum y la línea angular representan la función de integración y respuesta, respectivamente.	23
3.5. Diagrama de flujo para un algoritmo genético general. Las siglas “CP” indican un criterio de paro en específico (por ejemplo, máximo número de generaciones, adecuación del individuo más apto o adecuación promedio por encima de un umbral, etc.). Creado por el autor.	31

3.6. Algunos casos de error en comparaciones no morfológicas. El caso A muestra dos imágenes con la misma forma pero muy diferentes según una métrica pixel a pixel; el caso B muestra dos imágenes que serían iguales para una métrica que midiera áreas; el caso C es otro ejemplo patológico en el que una métrica no morfológica fallaría totalmente. Imágenes tomadas de [56].	32
3.7. Diferencia entre celdas centrales de borde e interiores. A. Celda interior; B. Celda de borde.	33
4.1. Figuras diferentes construidas con la misma área (900 pixeles). Tomado de [16]	41
4.2. Mapas usados como insumo del modelo: (a) distancia a carreteras pavimentadas; (b) distancia a carreteras de terracería; (c) distancia a brechas; (d) distancia a cuerpos de agua perenne; (e) distancia a infraestructura hídrica; (f) distancia a parches de la categoría Dt1; (g) distancia a parches de la categoría Dt2; (h) distancia a parches de la categoría Dt3; (i) distancia a la costa.	51
4.3. Mapas usados como insumo del modelo: (a) pendiente; (b) elevacion; (c) orientación; (d) densidad de celdas de la categoría Dt1; (e) densidad de celdas de la categoría Dt2; (f) densidad de celdas de la categoría Dt3; (g) distancia a la RBCh-C (h) sensibilidad.	52
5.1. Cobertura correspondiente al año 2004.	60
5.2. Cobertura correspondiente al año 2009	61
5.3. Comparación de calibraciones con respecto a la cobertura 2009 proveniente de la clasificación. (a) Cobertura 2009; (b) Calibración con operadores multigraduados; (c) Calibración con redes neuronales.	65
5.4. Serie de tiempo construida con las predicciones arrojadas por el escenario “base”.	66
5.5. Serie de tiempo construida con las predicciones arrojadas por el escenario “mitad”.	67
5.6. Serie de tiempo construida con las predicciones arrojadas por el escenario “completo”.	68
5.7. Proporciones ocupadas por cada categoría en el tiempo según los tres escenarios construidos: (a) Escenario “base”; (b) Escenario “mitad”; (c) Escenario “completo”.	70

5.8. Cambio en área para la cobertura vegetada (Vt1,Vt2 y Vt3) según los tres escenarios construidos.	71
5.9. Cambio en el número de parches para las cobertura vegetada (Vt1,Vt2 y Vt3) según los tres escenarios construidos.	73
5.10. Cambio en conectividad según el índice RS para la cobertura vegetada (Vt1,Vt2 y Vt3) según los tres escenarios construidos.	74
5.11. Cambios ocurridos en los distintos periodos según el escenario “completo”.	75
5.12. Diferencia entre los escenarios ”base“ y ”completo“.	77
5.13. Efecto espacial de la desaparición de la RBCh-C en el periodo 2019-2024 con respecto al escenario ”completo“.	78
5.14. Umbrales asociados a cada variable para la transición Vt3 - Dt2.	79
A.1. Aspecto de la interfaz gráfica de usuario de acuerdo al estándar de GRASS en wxpython.	98
A.2. Generación del archivo de patrones de entrenamiento para la red neuronal mediante la interfaz gráfica de usuario.	101
A.3. Configuración de la aplicación para entrenar una red neuronal con el archivo de patrones previamente generado.	103
A.4. Graficador de error que se abre y actualiza en tiempo real durante la ejecución. 104	
A.5. Configuración de la aplicación para calibrar un modelo de operadores multigraduados. 106	
A.6. Graficador de adecuación que se abre y actualiza en tiempo real durante la ejecución.	107
A.7. Configuración de la aplicación para correr distintas simulaciones.(a) Correr modelo de redes neuronales; (b) Correr modelo de operadores multigraduados. 109	

Índice de cuadros

4.1. Características de las imágenes empleadas como insumo de clasificación (multiespectrales) y como apoyo visual (pancromáticas)	36
4.2. Matriz de confusión hipotética para dos categorías (modificado de [13]) . . .	38
4.3. Variables empleadas como entradas para los distintos modelos construídos. La cartas topográficas de INEGI comprenden actualizaciones hasta el año 2000.	57
4.4. Relación de costos asignados para la genreación del mapa de costo basado en la pendiente, tipo de cobertura y vías de comunicación.	58
5.1. Matriz de confusión para la clasificación correspondiente al año 2004. . . .	59
5.2. Matriz de confusión para la clasificación correspondiente al año 2009. . . .	62
5.3. Certidumbre por categoría para ambos periodos.	63
5.4. Área total de cada tipo de cobertura reportada en kilómetros cuadrados y porcentaje con respecto al área total de cada clasificación en la serie de tiempo.	63
5.5. Conversiones entre las distintas clases de coberturas naturales y coberturas correspondientes a alguna forma de degradación. Los resultados se presentan en kilómetros cuadrados. Correspondencias: Vt1 = vegetación tipo 1; Vt2 = vegetación tipo 2; Vt3 = vegetación tipo 3; Dt1 = degradación tipo 1; Dt1 = degradación tipo 2; y Dt1 = degradación tipo 3.	64
5.6. Relación de número de iteraciones y error mínimo alcanzado para cada fragmento analizado durante el proceso de entrenamiento de la red neuronal artificial. .	64

- 5.7. Relación de número de iteraciones y adecuación máxima alcanzada para cada fragmento analizado durante el proceso de calibración por algoritmos genéticos bajo el método de operadores multigraduados. 69
- 5.8. Relación de áreas vegetadas sin perturbación aparente dada kilómetros cuadrados según las simulaciones generadas para cada escenario. 72

Resumen

La magnitud de la degradación ambiental que en el presente afecta a todos los ecosistemas mexicanos es el resultado de políticas de desarrollo que se han caracterizado históricamente por promover formas de manejo inapropiadas que comprometen tanto la identidad cultural de los pueblos originarios como la integridad de los recursos naturales. El alto grado de incertidumbre asociado a la información espacial disponible, el número de escalas relevantes y la interacción de factores sociales, políticos y económicos suponen el uso de herramientas capaces construir modelos espacialmente explícitos que se ajusten a estos requerimientos. La herramienta gratuita, libre y de fuente abierta aquí presentada permite elaborar modelos con estas características mediante la implementación de algoritmos de autómatas celulares, redes neuronales artificiales y programación genética con los que es posible trabajar la información a distintas escalas, directamente en un entorno SIG y con un manejo adecuado del ruido informacional.

Como caso de aplicación se construyeron distintos escenarios orientados a estimar el impacto de la construcción de una carretera en el área de influencia de la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala (RBCh-C) mediante simulaciones producidas por el módulo programado usando un algoritmo propio que involucra operadores lógicos multigraduados, algoritmos genéticos y métricas sensibles a la forma. Para alimentar el modelo se usaron mapas de vías de comunicación, variables topográficas, hidrología e infraestructura hidráulica, además de variables relacionadas con la vecindad de cada celda y la distancia a objetos de interés (RBCh-C, línea costera y coberturas antropogénicas). La calibración del modelo se realizó usando dos clasificaciones de cobertura generadas para el área de estudio las cuales fueron validadas con puntos de control recopilados en campo, además de puntos seleccionados al azar y validados por inspección visual y espectral. Los resultados estas simulaciones indican que la presencia del desarrollo vial induce un aumento en la degradación ambiental así como la redistribución de dicho proceso en el espacio. Ya que las características del algoritmo creado

permiten analizar la importancia de las variables empleadas en el modelo, se identificaron los factores determinantes en las principales transiciones hacia coberturas antropogénicas.

Además de estas simulaciones se realizó un ensayo sencillo en el que se retira la RBCh-C de la dinámica espacial. Los resultados de esta simulación indican que el área natural protegida tiene un efecto restrictivo sobre la degradación ambiental en las periferias. La aplicación programada constituye la base para un desarrollo posterior en el que se incuyan nuevos algoritmos y se planteen aplicaciones en problemas diversos no relacionados directamente con el cambio de uso de suelo.

Palabras clave: modelos espacialmente explícitos, redes neuronales artificiales, programación genética, inteligencia artificial, cambio de uso de suelo, Reserva de la Biósfera Chamela Cuixmala.

Abstract

The magnitude of environmental degradation that affects every Mexican ecosystem in the present days is the result of developmental politics that are historically characterized by promoting inappropriate managing schemas which compromise the cultural identity of the original people as well as the integrity of natural resources. The high degree of uncertainty associated with available spatial information, the number of relevant scales and the interaction of social, political and economical factors entail the use of tools capable of building spatially explicit models that fit such requirements. The free and open source tool here presented allows to construct models with this characteristics through the implementation of algorithms of cellular automata, artificial neural networks and genetic programming which can work at different scales directly within a GIS environment with proper managing of informational noise.

As a study case, different scenarios were built oriented to estimate the impact of the construction of a highway within the area of influence of the “Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala” (RBCh-C) through simulations produced by the programmed module using an algorithm designed by the author that involves multi graduated logical operators, genetic programming and morphological sensitive metrics. The calibration of the model was performed using two thematic classifications generated for the study area which were validated with control points gathered in fieldwork as well as randomly selected points validated using visual and spectral inspection. The results of this simulations indicate that the presence of the highway induces the rise of environmental degradation as well as the redistribution of this process in space. Given that the characteristics of the newly introduced algorithm allow to analyze the importance of the variables used in the model, the key factors that determine transitions to antropogenic categories were identified.

In addition, a simple test was performed in which the RBCh-C was removed from the spatial dynamics. Results show that the protected natural area has a restrictive effect on the

environmental degradation in the surrounding areas. The programmed application establishes the basis for further development that includes new algorithms and different implementations on diverse problems non related to land use cover change.

Key words: spatially explicit models, artificial neural networks, genetic programming, artificial intelligence, land use cover change, Reserva de la Biósfera Chamela Cuixmala.

Introducción.

. El acto de modelar corresponde a establecer una relación de identificación entre subestructuras de dos estructuras fundamentales: una formal, basada en el pensamiento y una natural, cuyas reglas suponemos dadas desde el inicio. En el campo de lo formal, las relaciones que conectan los elementos de la estructura son inferencias, mientras que en su contraparte material, se piensa en relaciones causísticas [52]. El método usual para establecer el contacto entre estas estructuras usualmente es la experimentación sobre componentes concretos. Con el incremento progresivo del poder de cómputo ha sido posible establecer nuevas formas de experimentar empleando simulaciones sobre fenómenos cuyas características impiden aplicar de manera sencilla el método científico clásico.

El empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG's) es actualmente una práctica ubícuca dentro del campo de las ciencias ambientales. La capacidad que tienen estos sistemas para integrar información de numerosas fuentes, generar inventarios cada vez más grandes además de la flexibilidad que les otorga un gran potencial para el desarrollo de una amplia gama de aplicaciones [44] les hace indispensables para la realización de estudios interdisciplinarios en los que se incorporan criterios de distintos campos del conocimiento para abordar problemas no contenidos propiamente en ninguno de ellos. Tal es el caso de los problemas ecológicos dentro de la escala paisajística, en los que, gracias a estas herramientas, ha sido posible comprender fenómenos socio - ambientales como el de cambio de uso suelo.

El impacto de las actividades humanas en los ambiente naturales es un fenómeno difícil de medir dada su naturaleza multifactorial que involucra el efecto de variables sociales, económicas, físicas y biológicas que le confieren características de un sistema complejo, en el sentido de ser un “sistema que contiene un gran número de partes que interactúan con la habilidad de generar una nueva cualidad de comportamiento macroscópico y cuyas manifestaciones son la formación espontánea de diferentes estructuras temporales, espaciales o funcionales” [33]. A su vez, dichas variables interaccionan en el espacio de tal forma que el

sinergismo o antagonismo de las mismas se manifiesta en patrones de degradación complejos y difíciles de explicar.

La información no espacializada respecto a las tasas de deforestación o degradación ambiental limita nuestra capacidad logística al momento de realizar estrategias regionales de conservación. Si se piensa en un hecho concreto que pueda modificar la dinámica geosistémica de un lugar, como puede ser la construcción de nueva infraestructura para abastecer las necesidades de una población en crecimiento o los intereses de inversionistas, las posibilidades que tenemos de predecir el alcance y los efectos dadas las interacciones mencionadas usando información no espacializada son remotas. De esta manera, las aproximaciones a este problema deben cumplir al menos con dos propiedades fundamentales: *espacialidad explícita* y *multidimensionalidad*.

Por otro lado, las propiedades mencionadas no son suficientes para modelar correctamente la degradación ambiental en el espacio pues existe un elemento de incertidumbre asociado a todas las etapas del proceso de modelación empezando por la información disponible respecto a los factores asociados. Así, cualquier aproximación debe cumplir además con un requisito extra que consiste en la *robustez frente a la incertidumbre*.

La intención de desarrollar el módulo enteramente en fuente abierta responde al objetivo de socializar el conocimiento científico para promover la investigación en este campo dentro de los sectores más marginados de la ciencia, especialmente en el llamado “tercer mundo”. Los esfuerzos coordinados de la comunidad “open source”, a la cual me adhiero orgullosamente, contribuyen a combatir la ofensiva de mercantilización de la ciencia que posiciona en competencia siempre desigual a los equipos de trabajo con recursos limitados. En esta lógica de mercado elitista, las principales empresas de software geográfico se enriquecen de la exclusividad exigiendo licencias a nuestras universidades por montos que bien podrían ser empleados en otros rubros de mayor prioridad (como por ejemplo, en viáticos para salidas a campo, equipo de laboratorio, becas para estudiantes, etc.).

1.1. Semblanza del proceso de devastación ambiental en México.

... sólo una sociedad ajena al desperdicio será capaz de generar la abundancia material que exige su sobrevivencia y la del resto de las especies; sólo una

sociedad fundada en sus raíces más hondas -y a la vez en sincronía con las nuevas primaveras- puede en verdad proponerse que su antigua morada florezca nuevamente; sólo en una sociedad donde los productores sean los gobernantes resultará innecesario que los seres humanos compitan por alimento y ambiente con las demás especies; sólo individuos sociales, dueños de su tiempo libre, serán capaces de explorar los ámbitos de la vida y de valorar sus infinitas interrelaciones.

(Mario Payeras, poeta, filósofo y guerrillero guatemalteco [48])

A pesar de que el cambio es un imperativo de la vida, la veloz transformación que ha sufrido el entorno natural en el último milenio y sobre todo en los siglos XIX y XX, no tiene precedentes en la historia de nuestro planeta. Con especial agudeza a partir de la década de 1950, la presencia humana se ha convertido en un factor dominante en el proceso de modificación de los patrones de biodiversidad y el estado de los ecosistemas. Tal es la magnitud del impacto humano que el Premio Nobel de Química Paul Crutzen sugiere que nos encontramos en una era geológica especial, caracterizada por la omnipresencia de la huella humana en los ecosistemas, que debería llamarse “Antropoceno”, distinguida más que por el simple cambio, por la tasa a la que este ocurre. Una manifestación conocida de este hecho es el aumento en la concentración de dióxido de carbono atmosférico, un fenómeno que ha ocurrido más de una vez en la historia geológica pero cuya aceleración en la actualidad representa una promesa de exterminio biológico. En las revisiones globales sobre el estado de la biodiversidad terrestre y marinas se hace manifiesta una tendencia de pérdida de especies a nivel mundial de magnitudes tan severas que se justifica la afirmación de que estamos enfrentando la sexta ola global de extinciones masivas en la historia geológica [21], lo cual puede entenderse como un cambio propio del Antropoceno.

Los factores que contribuyen a generar esta clase de comportamiento son difíciles de entender y actúan de forma heterogénea en el espacio. En general, se reconoce que existen factores últimos o indirectos, los cuales inciden modificando el comportamiento de los llamados factores próximos o directos [21], que son los ejecutores de la devastación ambiental que observamos. Los trabajos de Ehrlich y Holdren ([29],[28]) intentan dar un vínculo entre el impacto de la presencia de los seres humanos sobre el ambiente mediante la interacción del tamaño poblacional P , la afluencia A , o consumo de recursos, y el desarrollo tecnológico T , variable en la cual también se incluyen a través de la conocida fórmula $I = PAT$, la cual relaciona factores indirectos de reconocida importancia en una igualdad que, de acuerdo a su construcción, acentúa el efecto poblacional. Este enfoque responde a la tradición de

pensamiento malthusiano sobre la tasa de crecimiento poblacional y la disponibilidad de recursos y, a pesar de su utilidad, es posible que no logre capturar el efecto real de dichos factores ya que las interacciones entre los mismos pueden llevar a efectos inesperados, además de que en ocasiones es difícil definir las variables que integran la ecuación, como en el caso del factor T , que se integra a partir de instrumentos socioeconómicos que tienden a menospreciar el valor de los recursos naturales en toda su extensión, el cual involucra servicios ambientales, extracción, producción, transformación y el valor cultural que poseen los mismos para los pobladores autóctonos, entre otros procesos [21].

Un ejemplo interesante de excepción al planteamiento IPAT es el trabajo de Mendoza y Dirzo [43] realizado en la selva Lacandona, en el cual se encontró una relación inversa entre el crecimiento poblacional y el impacto ambiental para dichas comunidades, con lo que se hace notorio el efecto que tiene la herencia cultural en los procesos socio-ambientales. Sin importar el enfoque, es claro que el crecimiento demográfico, la cultura en general, la introducción de tecnologías (positivas o negativas en su impacto ambiental), las políticas públicas y la economía son factores indirectos que deben de tomarse en cuenta para lograr un entendimiento cabal de la devastación ambiental actual.

En el caso de México, podemos contar entre los factores últimos varios eventos históricos: el programa “Marcha al Mar”, el cual tuvo el objetivo de colonizar las costas con territorios “ociosos”, es decir, aquellas zonas cuya cobertura natural quedaba intacta hasta el momento, para activar su explotación agrícola, ganadera y forestal; la repartición de casi 18 millones de hectáreas de territorio a campesinos durante el sexenio de Lázaro Cárdenas; la aceleración desmedida del crecimiento demográfico desde la década de 1950 hasta la fecha; la creciente acentuación de la desigualdad social, producto de políticas económicas pauperizantes; la adopción de tecnologías agrícolas destructivas durante la llamada “Revolución Verde”; y el agudo proceso de deculturación de los pueblos indígenas [21], por mencionar algunos. Estos eventos han moldeado el presente ambiental hasta una situación crítica en la que las fuerzas que se oponen al avance de la degradación no son suficientes para frenar dicho proceso, el cual es acentuado y solapado por la omnipresente corrupción que padecen nuestras instituciones.

Hacia el año de 1976 se observaba ya una reducción del 38 % en la cobertura natural del país y en 1993, esta cifra aumentó hasta alcanzar un 54 %, lo que constituye una tasa de destrucción de 946,146 hectáreas por año durante dicho periodo, es decir, un 0,8 % anual. La tendencia de conversión continuó en la década posterior con una tasa de 0,5 % anual, que corresponde a 523,639 hectáreas por año [21]. La disminución en la tasa observada se debe en gran medida a que las coberturas naturales correspondientes a las tierras bajas del

trópico húmedo ya habían sido desmontadas en las décadas anteriores. Los ecosistemas más afectados por este proceso fueron y siguen siendo las selvas húmedas y secas del país, como se observa en las tendencias de cambio expresadas en la figura 1.1 que se incluye en la obra citada.

En el caso de las selvas húmedas, estas permanecieron en un estado más o menos prístino hasta la década de 1940, cuando inician las primeras políticas de colonización para impulsar la producción agrícola y ganadera, continuadas por fomentos crediticios y apoyos legales para estas mismas actividades entre 1950 y 1980, además de proyectos de exploración y explotación petrolera. Por otro lado, el efecto de degradación sobre las selvas secas se agudizó hasta la década de 1970 con la llegada de la “Revolución Verde“, la cual trajo consigo fomentos para la creación de nuevos distritos de riego, zonas ganaderas y plantaciones de frutales, además de nuevos ejidos y comunidades[21], así como un nuevo esquema de producción agrícola que agudizó la dependencia del campesino con respecto al agromercado, obligándolo a comprar insumos de los fabricantes [23], favoreciendo de esta manera las condiciones económicas que llevarían a la venta injusta de sus tierras a los nuevos agronegociantes.

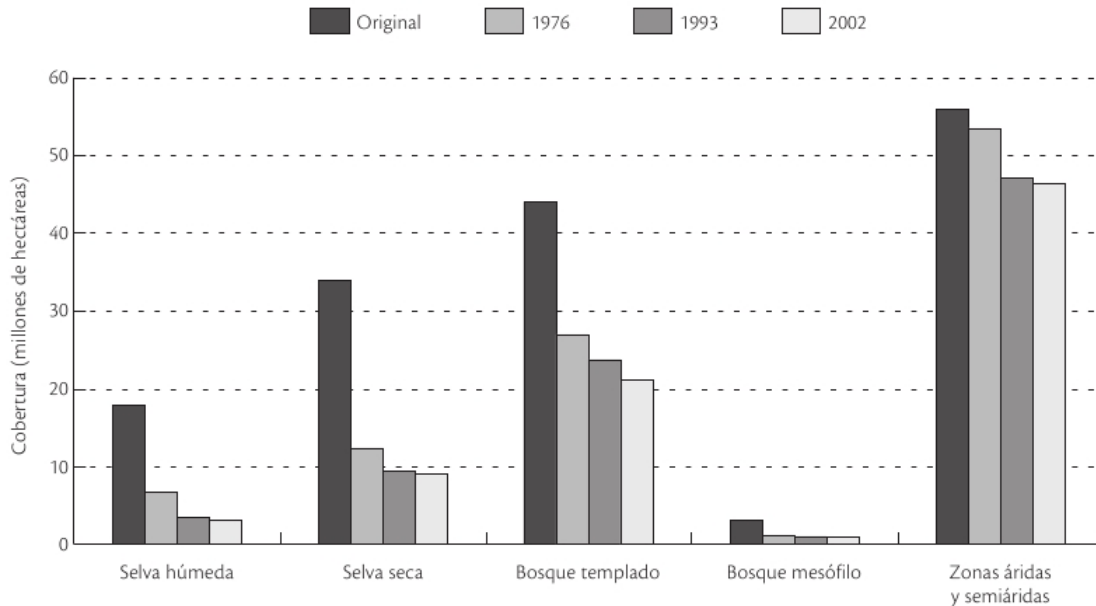


Figura 1.1: Tendencias de cambio en la cobertura de la vegetación primaria por tipo de ecosistema. Tomado de [21].

En suma, la degradación ambiental actual es producto de la interacción de factores que actúan a través de las poblaciones, las cuales toman decisiones con base en sus

propias interacciones y en determinaciones externas representadas por políticas públicas, crisis económicas, desarrollo tecnológico y procesos de influencia cultural (aculturación, deculturación y transculturación), sin agotar la enumeración de las mismas. Un aspecto importante que se hace evidente en la situación que padecemos es el ensanchamiento de las brechas económicas entre los países llamados "desarrollados" y el "tercer mundo", que se ha construido sobre la base de una política de saqueo de los recursos naturales por parte de los primeros hacia los segundos. Este robo internacional es acompañado por prácticas que atentan contra la salud e integridad cultural de las poblaciones autóctonas en un contexto de complicidad con las autoridades nacionales. Casos como el de la Minera San Xavier, rostro en México de la empresa *New Gold Inc* en el cerro de San Pedro, San Luis Potosí, formación que, a saber, se incluye en el escudo del estado, o el de la minera *First Majestic Silver Corp* en el "Cerro Quemado", dentro del territorio sagrado huichol de Wirikuta, en los que se utilizan y se utilizarán, respectivamente, técnicas extractivas que son ilegales en los países de origen de las empresas mencionadas, se multiplican en la actualidad¹. Por otro lado, al interior de países como el nuestro ha continuado el proceso de enriquecimiento de las clases altas con la necesaria pauperización de las mayorías, presionando a las poblaciones hacia formas de explotación que degradan el entorno natural a tasas aceleradas para satisfacer las presiones económicas de un mercado completamente separado de las nociones de justicia y bien común. Este mismo mercado de productos primarios en los que las variedades criollas no pueden competir, la introducción de variedades no adecuadas a las condiciones locales, el fomento al uso de agroquímicos que contaminan los suelos y enferman a los campesinos (sin mencionar al consumidor) y la amenaza de los productos transgénicos para la conservación del acervo genético de las plantas cultivadas nativas, son todas manifestaciones de la interacción de estas dos contradicciones intra e internacionales.

1.2. La situación de las selvas secas en nuestro país.

Los bosques tropicales secos o selvas secas son uno de los tipos de vegetación tropical más importantes y extensos en México y Mesoamérica. Alrededor del 42 % de los bosques tropicales del planeta pertenecen a esta clasificación y se estima que hasta 1,048,700 km^2 de selvas secas conservadas se distribuyen todavía entre las tres regiones tropicales del mundo. Se definen como ecosistemas con más del 50 % de árboles caducifolios, una temperatura media

¹De hecho, las dos empresas mencionadas provienen de Canadá, un país conocido por sus grandes esfuerzos de conservación locales.

anual > 25 grados centígrados, una precipitación total anual entre los 700 y los 2000 mm y la presencia de tres o más meses de sequía cada año [53]. Se encuentran distribuidos a lo largo de la costa del Pacífico desde el Trópico de Cáncer, México (28°N) hasta el norte de Costa Rica (10°N) [49]. Su conversión a pasturas y cultivos ha sido una práctica común en toda la república y los bosques intactos son muy escasos [18]. Tan solo en nuestro país, únicamente el 27 % de las selvas originales permanecen sin disturbios, mientras que el 73 % restante presenta algún tipo de disturbio y se ha calculado una tasa de deforestación anual del 1,4 %, la cual ha provocado un patrón de selvas secas fragmentadas y perturbadas a lo largo del país [59], siendo consideradas como el ecosistema tropical más amenazado del mundo [45][36]. Al ser el hábitat de origen de los principales cultivos mexicanos (maíz, frijol y calabaza), han sido transformadas para la producción agrícola desde hace miles de años [21]. Su distribución potencial abarca 25.9 millones de hectáreas en el país, de los cuales, para el año de 1970 solo se registraban 9.1 millones de hectáreas de vegetación primaria en la zona bioclimática, conservados principalmente en la zona de la Sierra de la Laguna, Baja California Sur, en el pie de la Sierra Madre Occidental, sur de Sonora y Sinaloa, en las sierras de la costa de Jalisco y en la cordillera costera del sur (Guerrero y Michoacán).

Para el año de 1993 el proceso de degradación avanza y la cobertura primaria que resta es de 7.5 millones de hectáreas, debido a la conversión a selvas secundarias, principalmente en las zonas de Jalisco, Michoacán, Colima y las Sierras Orientales de Oaxaca, y al establecimiento de nuevos terrenos agrícolas y ganaderos. En el año 2002, la cobertura de selvas primarias restantes era de alrededor de 7 millones de hectáreas como una continuación del proceso de degradación descrito fomentado por el sector agropecuario y manifestado principalmente en las zonas de Sonora, Sinaloa y las costas de Jalisco, Colima y Michoacán, además de conversiones de selvas secundarias en las zonas de Guerrero, Veracruz y la Depresión Central de Chiapas dentro de este mismo sector productivo, con lo que se alcanzaron en total 10.4 millones de hectáreas de ganadería y agricultura en la zona bioclimática de las selvas secas [54].

En la figura 1.2 se muestran proyecciones de cambio para las distintas coberturas analizadas en el “Capital Natural de México“ partiendo de las extensiones observadas en la serie III (2002) y usando las tasas de cambio del periodo 1993-2002 bajo el supuesto de tasa constante y estabilización. De acuerdo con este análisis, la cobertura dominante en el futuro serán los poblados y ciudades, los cuales constituyen un estado absorbente, es decir, un estado que, una vez alcanzado, no da lugar a nuevas transiciones. Este pronóstico es razonable si se observa el comportamiento típico de cambio de uso de suelo en las zonas rurales, en las

cuales se pasa de una cobertura natural a la explotación agrícola, seguida de un periodo de explotación ganadera y el establecimiento de núcleos poblacionales que se expanden, integrando servicios e infraestructura que favorecen el crecimiento demográfico con miras a establecer un nuevo centro urbano.

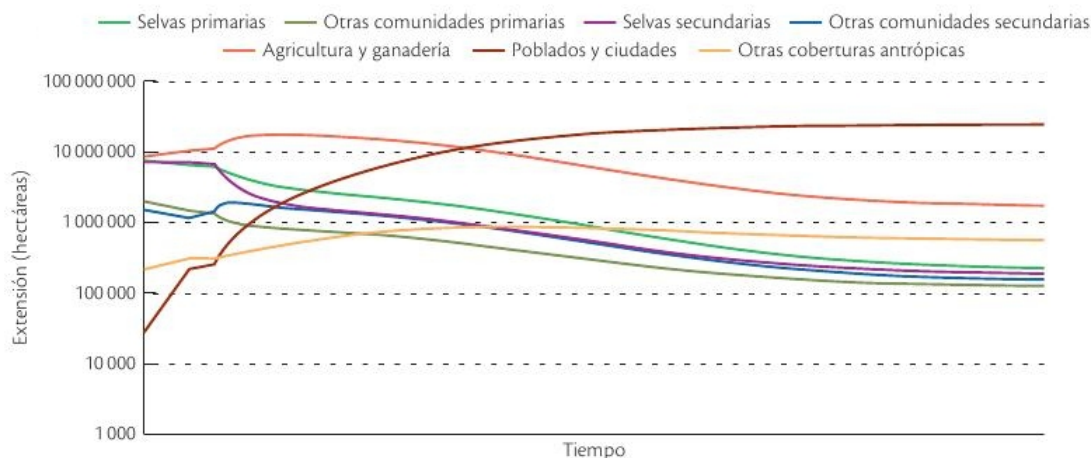


Figura 1.2: Proyección de los procesos de cambio en la región bioclimática de las selvas subhúmedas del país. Tomado de [54].

1.3. Breve historia ambiental de Chamela.

Los antiguos pobladores de la costa del Pacífico fueron probablemente tribus nahuas de "tecos" (guerreros) y "cocas" (agricultores). Sus principales asentamientos se encontraban en las regiones de Tomatlán y Cihuatlán, no obstante, durante el periodo precolombino no se dieron condiciones favorables para el desarrollo de grandes centros poblacionales y sus habitantes mantenían producciones de autosubsistencia si impactar significativamente la estructura y dinámica de los ecosistemas [26].

La deforestación que se ha dado en la segunda mitad del siglo 20 es el resultado de políticas dirigidas a incrementar la frontera agropecuaria. Esta expansión de tierras agrícolas y ganaderas fue favorecida por diferentes programas gubernamentales, produciendo un patrón en el tiempo que involucra inicialmente la remoción total de vegetación nativa y quema del material vegetal para la incorporación de nutrientes al suelo que será usado para establecer cultivos (principalmente, maíz, frijól y sorgo). Con el tiempo, el suelo se degrada y la productividad decae, conduciendo a una segunda fase de manejo y degradación que involucra

la introducción de pastos exóticos para el establecimiento de zonas ganaderas. En la figura 1.3 se incluye una línea del tiempo con los principales eventos históricos involucrados en el manejo de la zona.

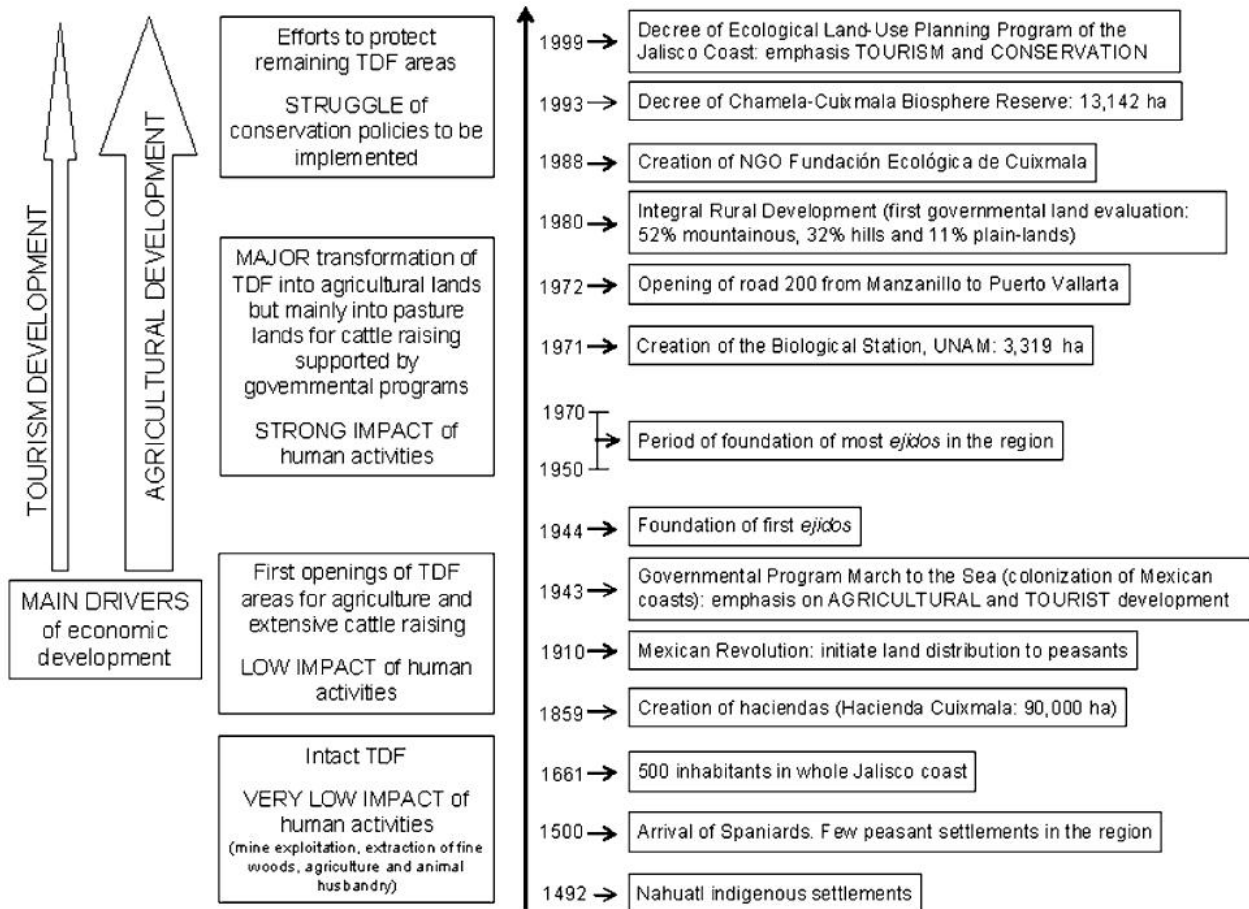


Figura 1.3: Línea del tiempo ambiental de la región de Chamela - Cuixmala. Tomado de [20].

El primer indicio de transformación de los ecosistemas ocurrió entre los años 1858 y 1872, periodo en el cual se establecieron las primeras haciendas en la zona, tales como la “Hacienda Cuixmala“, con la agricultura y ganadería como las principales actividades de transformación, además de la extracción de maderas preciosas como la caoba (*Swietenia humilis*) y el granadillo (*Platymiscium lasiocarpum*). En 1943 el gobierno mexicano crea el ya mencionado programa “Marcha al mar“ para colonizar las costas del país, y en el caso de Jalisco, este programa incluyó la distribución de parcelas entre los habitantes sin tierra y garantizó la tenencia para los pequeños propietarios. A pesar de que ya había algunos asentamientos previos en la región, la mayor parte de la población llega a establecerse desde

diferentes estados de la república con la fundación de los primeros ejidos entre las décadas de 1950 y 1960 [20].

Durante la década de los setenta, se implementa un programa gubernamental a nivel nacional que tiene como cometido la transformación de tierras forestales para su aprovechamiento agrícola y, a mediados de esta misma década, el gobierno impulsa el apoyo para clarear la selva mediante el uso de maquinaria pesada y quemadas masivas con el objetivo de establecer áreas de ganadería extensiva. Las zonas más llanas y los piedemontes fueron las primeras en ser afectadas, tanto por las actividades agropecuarias como por la explotación forestal. La mayor parte de la vegetación original en estas zonas se encuentra transformada actualmente como parcelas de cultivo aun activas. La remoción de la vegetación nativa era seguida por un periodo de cultivo de maíz de temporal que daba paso al establecimiento de pastizales cultivados con pastos exóticos (*Panicum maximum* Jacq. y *Cenchrus ciliaris* L.) adoptados en esta década. En las zonas de pendientes pronunciadas, la mayoría de los árboles no eran deseables para su aprovechamiento maderero y sólo algunas especies fueron extraídas [20]. Fue en esta década cuando la zona experimentó un aumento poblacional significativo gracias a la construcción de la carretera federal, la cual favoreció la inmigración desde otros estados [18], y a las ya mencionadas políticas nacionales relacionadas con la "Revolución Verde".

En cuanto a la dinámica de recambio de vegetación el patrón típico en la zona se ha conservado a lo largo del tiempo: En periodos de abandono o barbecho, puede iniciarse un proceso de regeneración natural con el establecimiento de vegetación leñosa dominada por *Acacia farnesiana* (L.) y *Mimosa arenosa* (Willd.), sin embargo, es común que las áreas con estas características se vuelvan a desmontar para iniciar un nuevo periodo de siembra. Al finalizar la temporada seca y para dar inicio a un nuevo ciclo productivo en los pastizales, los campesinos usualmente clarean los rebrotes leñosos y algunas veces queman los restos. En las crestas, la vegetación persiste usualmente, aunque no intacta, y las crestas más inaccesibles constituyen las únicas zonas donde se puede encontrar vegetación sin disturbio [18].

A partir de 1980, el turismo ha constituido una fuerza transformadora de los ecosistemas naturales en las costas de Jalisco (especialmente de los manglares) gracias a la inversión de capital gubernamental y extranjero [21]. El modelo de desarrollo turístico, el cual involucra la construcción grandes complejos hoteleros, campos de golf, marinas y la transformación de las comunidades consteras en pueblos urbanizados, trae consigo el abandono progresivo de la producción primaria para abastecer la mano de obra necesaria para el mantenimiento de los servicios mencionados (siendo Puerto Vallarta un ejemplo típico de este proceso que podría

convertirse en el modelo base de desarrollo en el área de estudio). No obstante, la industria turística no ha ocasionado todavía grandes daños en la zona de Chamela - Cuixmala, en gran medida gracias al esfuerzo de investigadores y organizaciones ambientalistas que han frenado los intentos de desarrollo. A pesar de lo anterior, la gente de la zona ve el turismo como un elemento potencial para "atraer el progreso" hacia la costa y la conservación de los elementos naturales como una actividad que no les concierne [20]. La tierra, en este contexto, es una fuente de bienes directos que se expresan en un producto vendible y, gracias a que la mayoría de los habitantes se estableció en la zona apenas hace unas décadas, el arraigo cultural hacia los ecosistemas es mínimo o inexistente.

La región de Chamela - Cuixmala es una de las pocas zonas del país que todavía conserva áreas de bosques tropicales de considerable extensión en buenas condiciones. Defender este territorio de las fuerzas devastadoras supone el mantenimiento de múltiples frentes de lucha que involucran desde la investigación básica hasta la defensa legal y la pugna política. En un contexto de objetivización mercantil de los recursos, esta batalla es especialmente ardua y debemos echar mano de todos nuestros recursos como sector conservación. La herramienta que aquí se presenta es una humilde contribución para quienes son conscientes del deterioro ambiental y se niegan permanecer pasivos frente al espeluznante futuro que nos pisa los talones.

Objetivos

Objetivo general

Crear una herramienta informática gratuita y de fuente abierta contenida dentro del SIG GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) para modelar fenómenos de cambio de uso de suelo en el espacio con énfasis particular en dinámicas de deforestación.

Objetivos particulares

Utilizar la herramienta programada para realizar simulaciones sobre el caso de la zona de influencia de la Reserva de la Biósfera Chamela-Cuixmala, como un ejemplo de aplicación y para mostrar su utilidad mediante la manipulación de supuestos respecto a la construcción de una carretera pavimentada en la zona norte del área de estudio bajo tres escenarios distintos de desarrollo, así como un caso especial en el cual se retira la RBCh-C para explorar su influencia sobre las áreas circundantes.

Antecedentes.

El problema de modelar la dinámica espacial del cambio de uso de suelo fue abordado en un principio con un enfoque claramente orientado al crecimiento de ciudades. El modelo que aquí se presenta es heredero del planteamiento reticulado ya introducido en la década de los 60's por Chapin y Weiss [22], en el que se proponía el uso de celdas de 300x300 metros, las cuales tenían un estado y una probabilidad o potencial de cambio asociado, para simular el crecimiento de la ciudad de Greensboro North Carolina. Este trabajo sirvió de base para introducir posteriormente la idea de los *autómatas celulares* como fundamento metodológico. Sin embargo, no fue sino hasta finales de la década de los 70's que se reconoció la importancia de la vecindad en el esquema reticulado para capturar las propiedades dinámicas del crecimiento urbano con los trabajos de Waldo Tobler [58], quien enuncia en su trabajo pionero sobre el crecimiento de la ciudad de Detroit lo que hoy se conoce como "leyes de la geografía":

"Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things."

Este hecho de profunda simplicidad, fundamenta el supuesto de usar las vecindades como insumo de las reglas que modelan el cambio en los fenómenos espaciales. La estructura básica que aportó Tobler marcó la pauta metodológica que generó toda la variedad de modelos que hoy existen para el fenómeno de crecimiento de ciudades y su contraparte rural. Si bien, el enfoque de los autómatas celulares no es suficiente para capturar cualitativamente toda la dinámica que implican estos fenómenos, su elaboración en planteamientos que involucran propiedades sociales y económicas de interés constituye un punto de partida para cualquier aproximación espacial a este problema.

En la literatura se pueden encontrar muchos ejemplos en los que se usan autómatas celulares combinados con reglas de transición markovianas [12], redes neuronales [50][42] o algún tipo de método heurístico como los algoritmos genéticos [40]. Es también común

encontrar aproximaciones de *Modelación Basada en Agentes* (MBA), un enfoque que intenta simular el comportamiento de los actores involucrados en los fenómenos espaciales descritos [40][30]¹. A pesar de que hay ciertas tendencias generales, las aplicaciones existentes poseen características muy variadas y la mayoría se enfoca en un fenómeno determinado, ya sea deforestación o crecimiento urbano.

Dentro de un mismo paisaje podemos encontrar comportamientos diversos de acuerdo a la cobertura analizada (poblados, zonas agrícolas, zonas ganaderas, desarrollos industriales, etc.), de manera que la integración de dinámicas variadas sobre un mismo sistema es una propiedad esencial para la correcta modelación del cambio de uso de suelo [62]. Algunas aplicaciones con un enfoque integrativo de reconocida eficacia son: el modelo SLEUTH [27], el modelo Dyna-Clue [62] y el modelo DINAMICA [57], siendo el último un desarrollo latinoamericano, las cuales involucran una o más de las herramientas teóricas que se describen más adelante.

En nuestro país, son pocos todavía los trabajos en los que se aborda la modelación espacial de cambio de uso de suelo en entornos rurales. Destacan los trabajos de Manson [40][41] en la península de Yucatán dentro del área de influencia de la reserva de Calakmul, en los que se usa el ya mencionado enfoque de MBA combinado con técnicas de programación genética, produciendo un excelente análisis de los factores y actores involucrados en el cambio de uso de suelo bajo la creación de distintos escenarios institucionales, demográficos y productivos, además del trabajo de López y colaboradores [38], en el cual se hace un análisis de la dinámica en las periferias de la ciudad de Morelia.

En el caso particular de la región de Chamela - Cuixmala, hasta donde se pudo indagar, no existen trabajos con enfoques similares al que se plantea en esta tesis, sin embargo, existen numerosos esfuerzos que aportan información valiosa a través de descripciones de la dinámica de recambio de coberturas [18][53], así como la historia del proceso de degradación ambiental y su relación con las comunidades humanas [20], cuya aportación al conocimiento de este fenómeno rebaza por mucho al de una sencilla simulación. Por otro lado, tanto la programación nativa en un entorno SIG, como la incorporación de métricas sensibles a la forma, inspirada en el trabajo de Fidel Serrano Candela [56], constituyen uno de los atractivos principales de la aplicación que incluso al término del presente trabajo, sigue gestándose.

En los párrafos siguientes se describen las principales herramientas matemáticas y

¹ Esta perspectiva constituye un caso particular de lo que más adelante se definirá como "Sistema de Automatas Geográficos"[15], un concepto que intenta establecer una base formal de modelación para este tipo de fenómenos

computacionales que fueron utilizadas para lograr las características para el sistema. La elección de dichas herramientas es parte de una exploración constructiva hacia la creación de un compendio de utilidades que serán incluidas a futuro en el módulo geográfico además de las ya implementadas al momento de la publicación de este trabajo.

3.1. Sistemas de Información Geográfica de Fuente Abierta

Los sistemas de información geográfica son descritos a menudo como la integración de datos, hardware y software diseñados para el manejo, procesamiento, análisis y visualización de información georreferenciada. El desarrollo comercial de los SIG's ha provocado la sectorización del conocimiento debido a los altos costos de los derechos de la paquetería, además de restringir la creación individual y colectiva de nuevas herramientas a partir de las ya existentes. A diferencia de los sistemas de propietario ampliamente usados, los SIG's de fuente abierta juegan un papel importante en la adaptación de dicha tecnología al estimular enfoques experimentales nuevos que permiten el acceso a estas tecnologías para los usuarios que no pueden o no quieren usar productos de propietario [46].

La plataforma de desarrollo SIG empleada en el presente proyecto es el Geographical Resources Analysis Support System o GRASS, por sus siglas en inglés, el cual es un proyecto de software libre y abierto liberado bajo la licencia GNU GPL v2. Este software fue desarrollado como respuesta a la necesidad de mejores análisis de cambio en el paisaje en tierras manejadas por el gobierno de los Estados Unidos y el potencial emergente de las herramientas computacionales para el análisis espacial. El núcleo de componentes de GRASS fue desarrollado originalmente por el USA-CERL (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory) en Champaign, Illinois durante 1982-1995, como una herramienta para el manejo espacial y planeación ambiental. Cuando el USA-CERL abandona el desarrollo activo del proyecto en 1995, la versión 4.2.1, publicada en 1998, fue coordinada por Markus Neteler en el Instituto de Geografía Física y Ecología del Paisaje de la Universidad de Hannover. El desarrollo de la versión 5.0 de GRASS empezó en 1999 cuando fue liberada bajo la licencia GNU GPL. Desde el año 2001, el equipo de desarrollo de GRASS tiene sede en FBKITC-irst (Centro per la Ricerca Scientifica e Tecnologica), Trento, Italia, en donde el proyecto ha tenido continuidad hasta la fecha gracias al trabajo de programadores provenientes de todas partes del mundo con contribuciones

individuales o de equipos radicados en distintas universidades [46]. El código completo de GRASS, así como referencias de documentación y enlaces a módulos externos no incluidos en las versiones disponibles, pueden ser consultados y/o descargados en la página oficial del proyecto: <http://grass.osgeo.org>

3.2. Sistemas de Autómagas Geográficos

Formalmente, un autómata (finito) A se encuentra definido por tres conjuntos S , Σ y S^* , además de una función de transición de estado o simplemente función de transición

$$T : S \times \Sigma \longrightarrow S$$

donde: $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ es un conjunto finito de estados; $\Sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m\}$ es un alfabeto finito de entrada; y $S^* \subseteq S$ es el conjunto de estados de aceptación o salida. Las reglas de transición definen el estado S_{t+1} en el tiempo $t + 1$ dependiendo de su estado $S_t \in S$ y la entrada $I_t \in \Sigma^*$ (donde Σ^* es el conjunto de todas las palabras finitas formadas a partir de Σ) en el tiempo t :

$$T(S_t, I_t) = S_{t+1}$$

Los autómatas celulares (AC) poseen estas mismas características con la única diferencia de que la entrada I estará definida de acuerdo a la interacción con otros autómatas. Su origen proviene inicialmente de los trabajos de Stanislaw Ulam, quién estudió el crecimiento de los cristales en la década de los 40 usando redes sobre lálices simples. Ulam postuló que un autómata celular simple se podría encontrar en conjuntos de reglas locales que generen patrones matemáticos en espacios de dos y tres dimensiones donde el orden global se produce por la acción local. Paralelamente, John von Neumann, un colega de Ulam en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, se encontraba trabajando con sistemas autorreplicativos e, inspirado por los trabajos de Ulam, llegó a la construcción de una máquina autorreplicativa compleja con un espacio celular de dos dimensiones donde cada célula tenía 29 estados que funcionaban en una vecindad de cuatro células [37]. Con este desarrollo, von Neumann demostró que cualquier patrón podría producir copias infinitas de sí mismo dentro de un espacio celular dado [63]. Las ideas centrales postuladas en los trabajos de Ulam y von Neumann han contribuído a entender la complejidad como un fenómeno que puede producirse por la acción

de elementos similares que interactúan localmente, generando patrones y procesos que se encuentran relacionados con el comportamiento de los fenómenos naturales.

Las células o celdas son las unidades espaciales básicas del espacio celular. Estas se encuentran organizadas en un tipo especial de teselación, que en nuestro caso corresponde a una gradilla bidimensional. Cada célula, como en cualquier autómatas, puede tomar un solo estado que depende de sí mismo y de los estados de las células con las que interactúa. El conjunto de células con las que cada célula interactúa se llama vecindad y generalmente se define para todo el espacio celular. Las vecindades más comunes son la vecindad de von Neumann (de cuatro células) y la vecindad de Moore (de ocho células). El autómatas existe en una dimensión temporal y todas las células se actualizan de manera simultánea en cada iteración sobre el tiempo [37]. Su actualización depende de las reglas de transición T definidas en función de la vecindad R :

$$T(S_t, R) = S_{t+1}$$

Con esta sencilla construcción, un AC es capaz de modelar procesos dinámicos a gran escala a partir de la interacción de elementos similares en el tiempo, mostrando características emergentes de interés que pueden conducir a un mejor conocimiento de los mecanismos subyacentes a los fenómenos observados.

Teniendo en mente el concepto de un AC podemos plantear la idea de un **sistema de autómatas geográficos** (SAG), en el cual se añade a la construcción previa el comportamiento geográfico utilizando un conjunto de reglas de georreferenciación para situar espacialmente al autómatas. De acuerdo a un criterio de movilidad, los SAG's pueden ser clasificados en fijos y no fijos. Los no fijos poseen un elemento de movilidad que les permite cambiar de posición en el espacio dentro de la n -tupla que les define, mientras que los fijos carecen de esta característica y se comportan en mayor semejanza a los AC [15]. En nuestro caso, trataremos con SAG's fijos al tener como componentes celulares a fragmentos del paisaje. Partiendo de la definición de Benenson y Torrens (2009), podemos construir una definición particular de un SAG para el caso fijo que nos compete:

Un SAG (en el sentido de este trabajo) es un autómatas G tal que:

$$G \sim (S, T, L, R)$$

En este caso S representa el conjunto de estados del autómata, T representa las reglas de transición, L representa la georreferenciación del autómata y R representa la vecindad del mismo. Bajo este modelo, las reglas de transición estarán dadas de la siguiente manera:

$$T(S_t, L, R) = S_{t+1}$$

Así, T depende del parámetro L de una forma definida externamente a la mera estructura de las vecindades. Con esta nueva definición, es posible relacionar el estado, la vecindad y la posición de una célula en el espacio, permitiendo la incorporación de nuevas variables que dependen de L , lo cual otorga una mayor libertad en la construcción de T , con lo que es posible modelar dinámicas complejas y realistas en un marco espacial. Más adelante se dará explícitamente la forma en la que se incorporarán dichas variables y la definición de las mismas. El concepto de SAG es suficientemente general para la incorporación de nuevos atributos a cualquier modelo con esta estructura sin modificar el planteamiento inicial, ya que las reglas definidas para la transición de cada argumento en la tupla son arbitrarias y es posible introducir herramientas como las que se mencionan a continuación.

3.3. Redes Neuronales Artificiales y el Algoritmo de Retropropagación.

Como se explicó, un SAG requiere de una regla de transición, la cual determinará el estado de cada celda al tiempo $t + 1$ a partir de cierta información para el tiempo t . En el caso del módulo construido, la regla de transición se encuentra determinada por diferentes criterios, entre los cuales se abordarán inicialmente las Redes Neuronales Artificiales (RNA's).

Una RNA es “...un ensamble interconectado de elementos simples de procesamiento, unidades o nodos, cuya funcionalidad está basada vagamente en la neurona animal. La habilidad de procesamiento de la red se encuentra almacenada en la fuerza de las conexiones interunitarias, o pesos, obtenidas por un proceso de adaptación o aprendizaje a partir de un conjunto de patrones de entrenamiento” [34].

En el caso de las redes neuronales artificiales, las neuronas estarán representadas por nodos, cada uno de los cuales presenta algún tipo de ponderación de las señales y un criterio de respuesta. El caso más sencillo se tiene cuando las variables de entrada son binarias y

no existen pesos asociados al cómputo de la salida de cada nodo, el cual corresponde al modelo propuesto por McCulloch-Pitts y se puede demostrar que cualquier función lógica $F : \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}$ puede ser computada y cualquier autómeta finito puede ser simulado por una red de este tipo [51]. El modelo de McCulloch-Pitts, fue generalizado por el modelo propuesto por Frank Rosenblatt en 1958, el cual se compone de unidades lógicas de umbral (TLU por sus siglas en inglés) y cuyo estado se encuentra determinado por su grado de activación, que a su vez se determina por la integración de información proveniente de los nodos de entrada. Para cada una de las conexiones o sinapsis que establece un TLU se encuentra asignado un peso, es decir, una constante real, el cual multiplica el nivel de actividad de la unidad de entrada y se puede ver un peso positivo como activador y un peso negativo como inhibidor de la respuesta [11]. El TLU computa su activación a como la suma de todas las señales multiplicadas por sus pesos:

$$a = \sum_{i=1}^n w_i x_i = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n$$

donde w_i es el peso de la i -ésima conexión, x_i es la respuesta de la i -ésimo elemento conectado y n es el número de elementos conectados al TLU que computa la activación. Si el resultado de la suma es mayor que un umbral establecido ε , el TLU dispara una respuesta (es decir, transmite el valor de 1), en otro caso, el TLU produce el valor de 0:

$$R(a) = 0 \text{ si } a \leq \varepsilon$$

$$R(a) = 1 \text{ si } a > \varepsilon$$

Con estas unidades y una estructura de conexiones especial basada en el modelo de percepción visual (figura 3.1), Rosenblatt construyó la primera red neuronal capaz de aprender, a la par que Widrow desarrollaba independientemente un modelo equivalente de nombre *Adaline*. Esta primera red, que lleva el nombre de perceptrón simple, fue construida con la intención de modelar la percepción y su meta principal era asociar patrones de entrada con respuestas, lo cual es equivalente a reconocer o categorizar los patrones de entrada [11].

La función de respuesta más sencilla para el TLU es una función escalón con valores binarios, pero es posible definir otro tipo de respuestas que arrojen valores continuos en un intervalo (generalmente el intervalo $[0, 1]$), como la función sigmoideal, designada por convención con el símbolo griego σ , cuya expresión matemática es la siguiente:

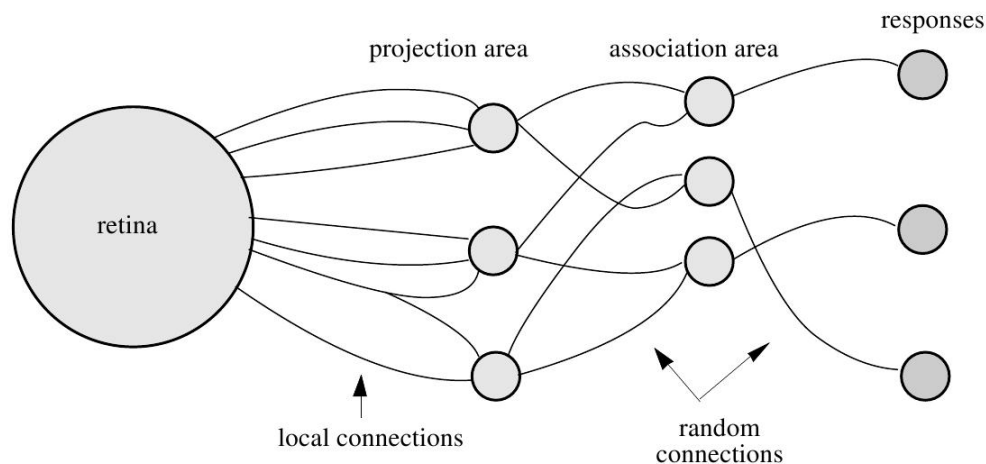


Figura 3.1: El perceptrón clásico. Tomado de [51].

$$\sigma(a) = 1 / (1 + \exp[-(a - \varepsilon) / \rho])$$

Donde ε es el umbral de activación, \exp es la función exponencial y ρ es una constante que determina la forma de la gráfica de la función. Para valores grandes de ρ , la curva tiene una forma aplanada y conforme ρ tiende a 0, la función se asemeja más a la función escalón descrita con anterioridad. Además de esta familia de funciones hay muchas otras que pueden aplicarse y cada una nos da como resultado un comportamiento global distinto de la red neuronal.

Las redes neuronales son usadas a menudo como “cajas negras”, donde una cierta entrada debe de producir una salida particular pero la manera en la que la red logra esta asignación se deja a cargo de un proceso autoorganizativo. En general, nos interesa mapear entradas n -dimensionales en salidas m -dimensionales, es decir, la red se comporta como una “máquina mapeadora” [51] que modela una función $F : R^n \rightarrow R^m$. Cada nodo en la red es una función similar a las descritas y al alimentar patrones de entrada, la información fluye a través de las aristas dirigidas según las reglas de composición usuales, es decir, cada nodo computa un valor con sus argumentos de entrada y el resultado se transmite como argumento de los nodos sucesores². Según lo anterior, además de la naturaleza de las funciones de evaluación, es claro que la *topología* de la red es determinante en su comportamiento. Aquí el término topología

²Se entiende por nodo sucesor del nodo i a cualquier nodo j tal que existe la arista dirigida (i, j) en el grafo de la red.

se refiere a la manera en la que se encuentran conectados los nodos de la red. Un ejemplo trivial es un patrón completo de conexión en el que de cada nodo parte una arista hacia cualquier otro nodo en la red. Dado un número de nodos n , la red con topología completa de n nodos puede dar origen a cualquier otra topología con el mismo número de nodos retirando aristas específicas para obtener la estructura deseada.

Si no hay ciclos en la red, el resultado del cómputo total está bien definido y no hay que lidiar con sincronización. Este es el caso del tipo de redes implementadas en el módulo programado y por ende en adelante supondremos que no existen ciclos en la red tratadas de manera que el cómputo en cada nodo ocurre sin retraso. A este tipo de redes se les llama de proalimentación o “feedforward” (ff) en inglés. Su topología permite particionar los nodos en capas: la primera capa c_0 consiste en los nodos de entrada, los cuales son evaluados en los valores de entrada del patrón, las siguientes capas se definen de manera recursiva como $c_{i+1} := \{x \in N \mid \exists (y, x) \in A, y \in c_i\}$, donde N es el conjunto de todos los nodos de la red y A es el conjunto de las aristas de la red.

3.3.1. Separabilidad lineal y redes multicapa.

La estructura del perceptrón simple permite resolver cierto tipo de problemas en los que es posible separar clases de entrada mediante elementos de dimensión inferior. Formalmente:

Dos conjuntos de puntos D_1 y D_2 en un espacio n -dimensional son linealmente separables si existen w_1, w_2, \dots, w_{n+1} números reales tales que para cualesquiera puntos $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in D_1$ y $(y_1, y_2, \dots, y_n) \in D_2$, se tiene que $\sum_{i=1}^n w_i x_i \geq w_{n+1}$ y $\sum_{i=1}^n w_i y_i < w_{n+1}$ [51].

Para hacer un poco más clara la propiedad de separabilidad lineal consideremos el caso cuando $n = 2$. Supongamos que A y B son dos conjuntos linealmente separables de dos dimensiones, entonces hay w_1, w_2, w_3 números reales tales que se cumplen las desigualdades de la definición, de tal forma la ecuación $w_1 v_1 + w_2 v_2 = w_3$, o de forma más familiar $v_2 = w_3/w_2 - (w_1/w_2)v_1$, es la ecuación de una recta (elemento de dimensión $n - 1 = 1$) que separa totalmente a los conjuntos A y B (ver figura 3.2). Si pensamos en que $\sum_{i=1}^n w_i v_i$ es la definición del producto punto $\mathbf{w} \cdot \mathbf{v}$ en un espacio n -dimensional, donde $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ y $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, entonces $\mathbf{w} \cdot \mathbf{v} = w_{n+1}$ es la ecuación de un hiperplano.

Cuando la estructura del espacio de entrada no admite separación lineal, como es el caso de la figura 3.3a, o siempre que hay más de una clase, como en la figura 3.3b, es necesario usar estructuras más complejas introduciendo capas ocultas como las mencionadas en la

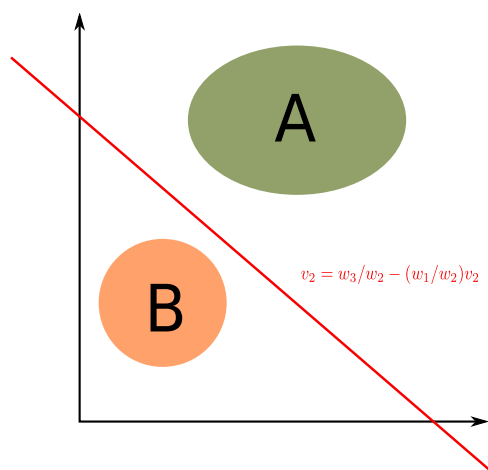


Figura 3.2: Separabilidad lineal en dos dimensiones. La ecuación de la recta se define con la ecuación de activación del perceptrón.

sección anterior. Estas nuevas capas se integran con el mismo tipo de nodos, recordando que la función de respuesta puede ser diferente en cada nodo, por lo que la separación no lineal se logra aplicando separaciones lineales subsecuentes según el número de capas ocultas que se incluyan en la red. La figura 3.3b nos da un buen caso para explicar cómo sucede lo anterior. Lo primero que hay que notar es que al trazar una de las dos líneas separamos linealmente dos pares de conjuntos. Sin pérdida de generalidad, supongamos que aplicamos la línea que separa AB de DC, este es un trabajo que se dejaría a una capa oculta con un solo nodo. Posteriormente, se necesitarían dos nodos en la capa de salida, uno para separar A de B y otro para separar D de C. En la figura 3.4 se muestra una estructura booleana que nos daría el comportamiento descrito.

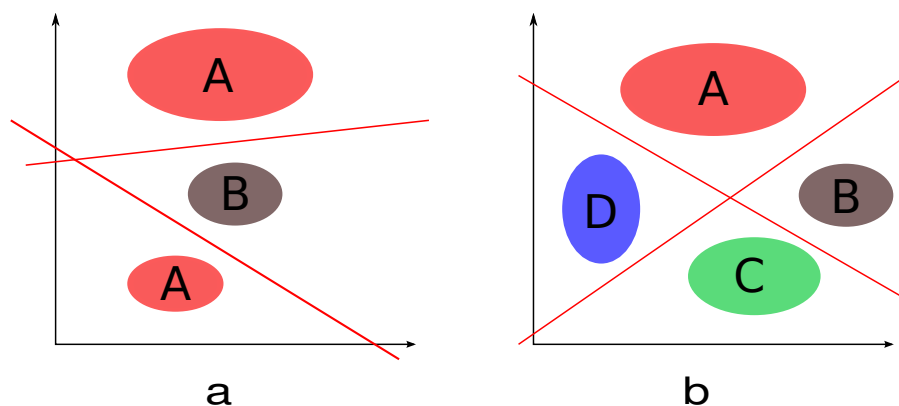


Figura 3.3: Separación de conjuntos no linealmente separables en dos dimensiones: a) Ejemplo con dos conjuntos; b) Ejemplo con más de dos conjuntos.

En el ejemplo anterior, conocemos a priori la estructura de los datos de entrada gracias a que se construyó con la imagen usada, sin embargo, esta es una situación que casi nunca se presenta, por lo cual es necesario tener un algoritmo para modificar los pesos de la red sin intervenir en el proceso directamente. A continuación se describen dos formas de lograr este cometido. En cuanto a la topología de la red, hay muchas opciones con recomendaciones para cada problema en particular pero en general, una buena recomendación es usar la topología $\langle n, 2n + 1, m \rangle$, donde n y m son el número de neuronas en la capa de entrada y salida, respectivamente [65].

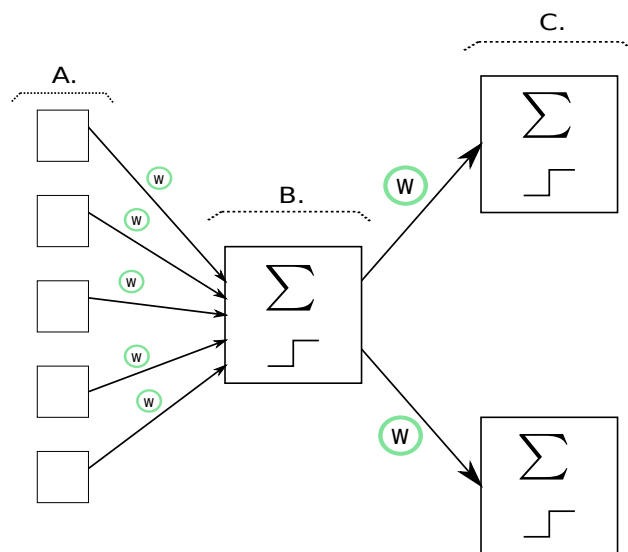


Figura 3.4: Estructura que resuelve el problema planteado en el ejemplo. A. Unidades de asociación; B. Capa oculta; C. Capa de salida. La letra “w” indica pesos asociados, mientras que el símbolo Σ y la línea angular representan la función de integración y respuesta, respectivamente.

3.3.2. Entrenamiento de la red.

En el proceso de aprendizaje de una red neuronal por lo general se encuentran involucrados dos pasos principales: la modificación de la topología, es decir, la creación o destrucción de conexiones; y la modificación de los pesos de las conexiones. Cuando el algoritmo de aprendizaje involucra únicamente el segundo proceso se trata de un algoritmo de *topología fija*, como es el caso de la presente implementación. Por otro lado, la manera en la que se modifican las características de la red para lograr su funcionalidad se puede realizar mediante un aprendizaje *no supervisado* o *supervisado*. La diferencia principal entre ambos

algoritmos consiste en que en el primero no se conocen *a priori* las salidas numéricas que la red debería de producir, mientras que en el segundo se tiene una muestra de salidas correctas que se corresponden con patrones de entrada determinados. En la presente se cuenta con una muestra de entradas y salidas correctas para calibrar, por lo que se eligió un algoritmo supervisado para el proceso de entrenamiento. Este algoritmo consiste a grandes razgos en presentar un conjunto de entradas o patrones de entrenamiento a la red, la cual computa una salida que es comparada con respuestas esperadas para calcular una desviación o error. Los pesos de las conexiones son modificados de acuerdo a la magnitud de este error con la intención de minimizarlo, de manera que se trata de un problema de optimización.

El algoritmo de retropropagación

La base de este algoritmo se encuentra en herramientas del cálculo diferencial y la idea principal es relacionar los cambios en los pesos en cada iteración con cambios en una función que represente el error, usando la técnica del *gradiente descendente*. Esta técnica se utiliza de forma diferente en las capas ocultas y las capas de salida. Inicialmente nos enfocaremos en las capas de salida ya que el algoritmo requiere de calcular el error en esta capa para el cálculo en las capas siguientes, es decir, en sentido contrario al flujo de la información desde la entrada, de ahí la palabra *retropropagación*.

La forma más sencilla de calcular el error en una red neuronal con miras a aplicar el algoritmo en cuestión es suponer que el error en cada patrón es igualmente importante, es decir, hacer corresponder a la función error o diferencia D con el promedio de las diferencias entre las salidas esperadas para cada patrón y las salidas que arroja la red:

$$D = 1/|P| \sum_{p \in P} d_p$$

Aquí, P es el conjunto de los patrones de entrada, $|P|$ es el cardinal o número de elementos en dicho conjunto, p es un elemento arbitrario de P y d_p es la diferencia entre la salida esperada v_p y la salida que arroja la red o_p para dicho patrón que usualmente se conjuga con un cuadrado para evitar tener valores negativos, es decir: $d_p = 1/2(v_p - o_p)^2$ (el coeficiente $1/2$ tiene la utilidad de eliminar coeficientes indeseables al derivar). Dado que nuestra intención es usar la técnica del gradiente descendente sobre la función error, es necesario que todas las funciones involucradas en su construcción sean suaves (diferenciables), un requisito que falla si la función de respuesta es booleana, por esta razón se debe hacer un cambio en d_p , ya sea tomando a_p , la función de activación, en lugar de o_p , la cual siempre es diferenciable por su

construcción, o cambiando la función escalón por una función suave (como la ya mencionada función sigmoideal). La biblioteca integrada en la programación del módulo usa siempre la segunda opción, por lo que no abordaremos la primera. Es importante notar que D tiene como variable independiente al vector de pesos de la red, es decir $D = D(w_1, \dots, w_n)$. Ahora, la forma que se le ha dado a d_p involucra a un solo nodo de salida, por lo que para tomar en cuenta el error en todos los nodos hay que tomar la suma de sus errores, es decir:

$$d_p = 1/2 \sum_{m \in M} (v_p^m - o_p^m)^2$$

donde M es el conjunto de nodos y v_p^m y o_p^m son el valor esperado y el valor calculado, respectivamente, para el patrón p en el nodo m .

De acuerdo con la técnica del gradiente descendente, para alcanzar el mínimo de una función y se modifica el valor de su variable independiente x en cada iteración de acuerdo a la pendiente, es decir, sumar o restar una cierta cantidad Δx que depende del cambio en $y(x)$, o, dicho de otra forma, de su derivada $\frac{dy}{dx}$, es decir, para nuestro caso:

$$\Delta x = -\alpha \frac{dy}{dx}$$

Sustituyendo en esta ecuación nuestra función de error global D y tomando en cuenta que D es una función de n entradas, tenemos que:

$$\Delta w_{mi} = -\alpha \frac{\partial D}{\partial w_{mi}}$$

donde Δw_{mi} es el cambio en el peso de la i -ésima conexión que incide en el nodo m y $\frac{\partial D}{\partial w_{mi}}$ es la derivada parcial de D con respecto al peso de la i -ésima conexión que incide en el m . El coeficiente α es comúnmente llamado *tasa de aprendizaje* y regula el comportamiento de búsqueda del algoritmo [34]. Para valores altos de α el cambio en los pesos es mayor, por lo que se produce una exploración rápida y con cambios de posición en D más drásticos que ayudan al inicio de la búsqueda. Cuando el entrenamiento se acerca al mínimo, es preferible evitar cambios de esta magnitud para no perder el avance, por lo que se usan valores menores en α .

Si nos quedamos con la última versión para Δw_i tendríamos ya una forma de alcanzar el mínimo, sin embargo, dado que D depende de todos los patrones, el costo computacional del cálculo se eleva demasiado, volviéndose inconveniente. Para evitar lo anterior podemos modificar esta ecuación de manera que los cambios se hagan con el error calculado para cada patrón presentado:

$$\Delta w_{mi} = -\alpha \frac{\partial d_p}{\partial w_{mi}}$$

Ahora, recordando que elegimos una función de respuesta suave para todos los nodos de salida y tomando en cuenta la regla de la cadena, tenemos que:

$$\frac{\partial d_p}{\partial w_{mi}} = \varphi'(a_m)(v_p^m - o_p^m)x_p^{mi}$$

donde x_p^{mi} es la i -ésima entrada proveniente del patrón p en el nodo m . Sustituyendo esta ecuación en la anterior tenemos finalmente la ecuación para calcular el cambio en los pesos de los nodos en la dirección del gradiente:

$$\Delta w_{mi} = \alpha \varphi'(a_m)(v_p^m - o_p^m)x_p^{mi}$$

Esta ecuación sirve para todos los nodos en una red con una sola capa, la de salida, por lo que para concluir la construcción del algoritmo de retropropagación hay que presentar Δw_{mi} por casos. El caso I es el que ya se presentó, cuando m es un nodo de la capa de salida. Para el caso II, cuando m es un nodo de la capa oculta, la contribución al error es una mezcla de qué tanto influye el cómputo de dicho nodo en los nodos de la capa de salida conectados con el mismo, expresado por el peso de conexión asociado, y la contribución de estos últimos:

$$ce_m = \sum_{j \in J_m} (v_p^j - o_p^j)w_{jm}$$

donde ce_m es la contribución del nodo m al error, J_m es el conjunto de nodos conectados con el nodo m , v_p^j y o_p^j son el valor esperado y el valor calculado para el patrón p en el nodo j conectado con m y w_{jm} es el peso de la conexión del nodo m al nodo j . Así, la variación de los pesos para nodos en la capa oculta en la dirección del óptimo queda como:

$$\Delta w_{mi} = \alpha \varphi'(a_m)ce_mx_p^{mi}$$

Con esta construcción, el algoritmo va modificando los pesos (inicialmente aleatorios) en cada iteración acercándose al mínimo u óptimo de la función error D hasta alcanzar un valor "aceptable" según el problema, lo que constituye la secuencia de paro [34]. No obstante, siempre es útil agregar una secuencia de paro alternativa que consista en un número de iteraciones máximo, ya que es posible que el error aceptable no se alcance en un tiempo adecuado.

En el caso de la presente aplicación las entradas de la red son todas las variables de interés para el cambio de uso de suelo, además de un estado temprano de uso de suelo, que en este caso corresponde a una mapa temático para el año 2004. Las salidas deseadas con las que se logra la calibración están compuestas por los valores de las mismas celdas en un mapa más actual para el año 2009. De esta forma, cada celda en el mapa representa un patrón de entrenamiento, con entradas y un valor esperado. Este aspecto se explica más claramente en

el apéndice.

3.4. Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos (AG) son un conjunto de métodos numéricos de optimización inspirados en la genética biológica y el mecanismo de la selección natural. El método que utilizan es muy general y se puede aplicar a una gran cantidad de problemas, suponiendo que se pueda dar una codificación adecuada al espacio de soluciones así como funciones de selección, recombinación y mutación que tengan sentido en el caso particular.

La idea de usar poblaciones de soluciones para resolver problemas de optimización fue considerada en varias ocasiones durante las décadas de 1950 y 1960, sin embargo, los AG fueron inventados en esencia por John Holland en esta última década y desarrollados por Goldberg posteriormente [32]. Las razones que tuvo para desarrollar estos algoritmos iban más allá de la resolución de problemas pues le interesaba el concepto de adaptación y concebía este método como una alternativa para estudiar el fenómeno biológico de la evolución [24]. No obstante, en la actualidad el interés por modelar la evolución con este tipo de herramientas computacionales (al menos de acuerdo a su definición inicial) ha sido relativamente abandonada, concentrándose en su utilidad como algoritmos heurísticos en problemas de optimización.

De forma general, un algoritmo genético consiste en lo siguiente:

1. Una población de soluciones (llamadas individuos) para un problema de optimización dado. Estas soluciones consisten por lo general en un vector de parámetros que inducen un resultado en el problema de optimización.
2. Un genoma para cada individuo de la población que codifica los valores de la solución en un conjunto de símbolos. Esta codificación, por lo general, es de tipo binario con algunas modificaciones ocasionales, como el código binario Grey, el cual “suaviza” las modificaciones genéticas de manera que diferencias en pocos bits del genoma determinen diferencias pequeñas en los parámetros de la solución. Una codificación correcta del problema constituye gran parte del planteamiento del algoritmo y es posible que no sea única.
3. Una función de adecuación que ordena el desempeño de cada individuo en la población, es decir, que evalúa cada solución asignándole un número real que representa su

- “adaptación”. Este componente del algoritmo es uno de los más importantes ya que determina el criterio de optimalidad, es decir, lo que consideramos una buena solución al problema en cuestión.
4. Un método de recombinación que dados dos individuos a y b produce una tercera solución c a partir de fragmentos de los genomas de los individuos a y b . Este proceso debe de combinar fragmentos de manera que el resultado sea una solución coherente, por lo que la manera en la que los genomas se combinan para producir un nuevo individuo depende en gran medida de la codificación dada.
 5. Un operador mutación que modifica aleatoriamente los genomas en cada generación.
 6. Un método de selección para generar una nueva población de individuos mutados y recombinados. Por lo general, este componente consiste en elecciones a al azar ponderadas con la adecuación de cada individuo. Un ejemplo común de este método es la selección por “ruleta”, el cual consiste en sumar las adecuaciones de los individuos para posteriormente normalizarlas a esta suma y asignar elementos proporcionales de una partición del intervalo $[0, 1]$ a cada individuo. La selección en este método se hace generando un número aleatorio en el intervalo dado y seleccionando al individuo al que le corresponde el elemento de la partición donde cae dicho número.
 7. Una función de paro, es decir, un criterio para terminar la búsqueda. Esta función, al igual que los demás componentes de los AG, es muy variable, pero por lo general se usa uno de los métodos siguientes o su combinación: un umbral de error aceptable que al ser alcanzado produce el paro del algoritmo; un mínimo de variación intergeneracional que produce el paro al no ser superado en un número determinado de generaciones; un número máximo de generaciones después del cual el algoritmo para.

Para cada problema de optimización existe un gran número (potencialmente infinito) de posibles soluciones. Se puede pensar en las posibles soluciones como combinaciones de parámetros que tienen asignado un valor en el criterio de optimización. En algunos casos, esta combinación y el valor de optimización, el cual se corresponde usualmente con la función de adaptación, definen superficies, pero en general, se puede pensar en un espacio solución S que consisten en n -tuplas $(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, y)$ donde x_i es el valor del i -ésimo parámetro de la solución y y es la adecuación o, en este contexto, el valor de la función de adecuación evaluada en los parámetros. De esta forma, el problema de optimización consiste en encontrar $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ tal que $y = f(\bar{x})$ es máximo (o mínimo, según el planteamiento) en S según

el orden de los reales. Cuando los parámetros son pocos, es posible aplicar métodos analíticos de optimización, por ejemplo, cuando S es un objeto geométrico bien definido, es decir, cuando hay relativamente pocos parámetros involucrados, sin embargo, en problemas donde el número de parámetros es elevado, es necesario usar otro tipo de métodos, tales como los AG. Estos espacios de solución o paisajes adaptativos, como se les llama en ocasiones, pensando en el símil de la evolución biológica, pueden tener geometrías complejas con numerosos picos y valles que se corresponden con soluciones óptimas y subóptimas. La naturaleza del espacio solución determina la dificultad para encontrar óptimos globales e incluso es posible que no exista tal, con lo que varias soluciones óptimas diferentes pueden tener la misma adecuación. Por otro lado, durante el proceso de búsqueda, si el espacio solución tiene óptimos locales (máximos o mínimos locales, según la codificación), existe la posibilidad de estancarse en los mismos sin tener acceso a soluciones de mayor adecuación.

De acuerdo con lo anterior, el método involucrado en los AG busca cómo lidiar con las posibles complicaciones de la búsqueda en la construcción de sus componentes. Las funciones de mutación y recombinación ayudan, entre otras cosas, a evitar un evento de estancamiento mediante la introducción de variaciones que puede bajar momentáneamente la adecuación promedio de la población para salir de un óptimo local y continuar la búsqueda de óptimos globales. Asimismo, asignación de un código genético binario produce que los eventos de recombinación y mutación generen potencialmente individuos muy diferentes, es decir, soluciones que se encuentran separadas en S , con lo que se disminuye aun más en riesgo de estancamiento. Por último, el método de selección influye mucho en el comportamiento de la búsqueda, ya que un criterio en el que se seleccionen estrictamente los genomas óptimos puede conducir a un cuello de botella en la búsqueda que también debe evitarse, al menos al inicio del proceso, por ello se usan métodos alternativos de selección como el que se describe arriba que aseguran la introducción de genomas subóptimos en la siguiente generación.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, existen condificaciones alternativas para disminuir las diferencias de las soluciones resultantes. La utilidad de este aspecto en los AG está en las fases finales de la búsqueda en las cuales es necesario “contener” la variación para evitar perder adecuación promedio en la población. Se puede entender este proceso como una búsqueda fina alrededor de los posibles óptimos que están en una vecindad de las soluciones planteadas por la población.

En la figura 3.5 se muestra un diagrama de flujo de un algoritmo genético general. Al inicio del algoritmo, los individuos pueden ser generados de manera totalmente aleatoria o como variaciones de un conjunto de parámetros que se acerquen a una optimalidad deseada,

con la intención de acelerar la búsqueda, y los genómas de los individuos son inducidos por los parámetros de cada individuo a través de la codificación asignada. En el paso siguiente, las adecuaciones de cada individuo son calculadas según la definición de la función de adecuación y se realiza la selección de los individuos que producirán la siguiente generación con un criterio basado en la adecuación. Posteriormente, se seleccionan pares al azar de los individuos óptimos seleccionados y se producen nuevos individuos recombinantes para sustituir los individuos no seleccionados de la generación anterior. Por último, el operador mutación se aplica a la población generada en el paso anterior introduciendo variaciones al azar en cada genoma y se produce la siguiente generación que regresa al paso 2. Los criterios de paro que se indican como “CP” en el diagrama son los que se describen con anterioridad.

En sentido estricto, el proceso aquí descrito se refiere a lo que comúnmente se llama “programación evolutiva”, ya que lo que se está optimizando es en realidad el funcionamiento de un código que desempeña la función evaluada. Un caso más cercano a la noción clásica de algoritmo genético involucraría únicamente la búsqueda de valores óptimos que pueden ser usados directamente como resultados (y no como parámetros de configuración de un programa).

La estructura de la herramienta programada cambió mucho en el tiempo de desarrollo. Inicialmente se había pensado en implementar redes neuronales calibradas con algoritmos genéticos para su aplicación en el caso de estudio. Esta parte del código sigue siendo vigente y es un método disponible para su aplicación. No obstante, como se menciona de forma más detallada en la discusión, de acuerdo a numerosas pruebas con distintos tipos de redes y variaciones de algoritmos, el tiempo de cómputo necesario resultó ser demasiado extenso como para pensar en la viabilidad de su aplicación dada la complejidad de la topología de las redes usadas. Por esta razón, se programó un método especial de aplicación con algoritmos genéticos que involucra reglas con operadores lógicos modificados para obtener el comportamiento deseado.

3.5. Multiescalaridad y sensibilidad a la forma.

Dentro de las fuentes de incertidumbre y error asociadas al análisis de series de tiempo sobre mapas, una de las más difíciles de superar es la incongruencia entre píxeles para distintos momentos que no tiene que ver con algún cambio de uso de suelo, sino con diferencias en cuanto al ángulo de toma del sensor en un satélite dado, las diferentes interpolaciones

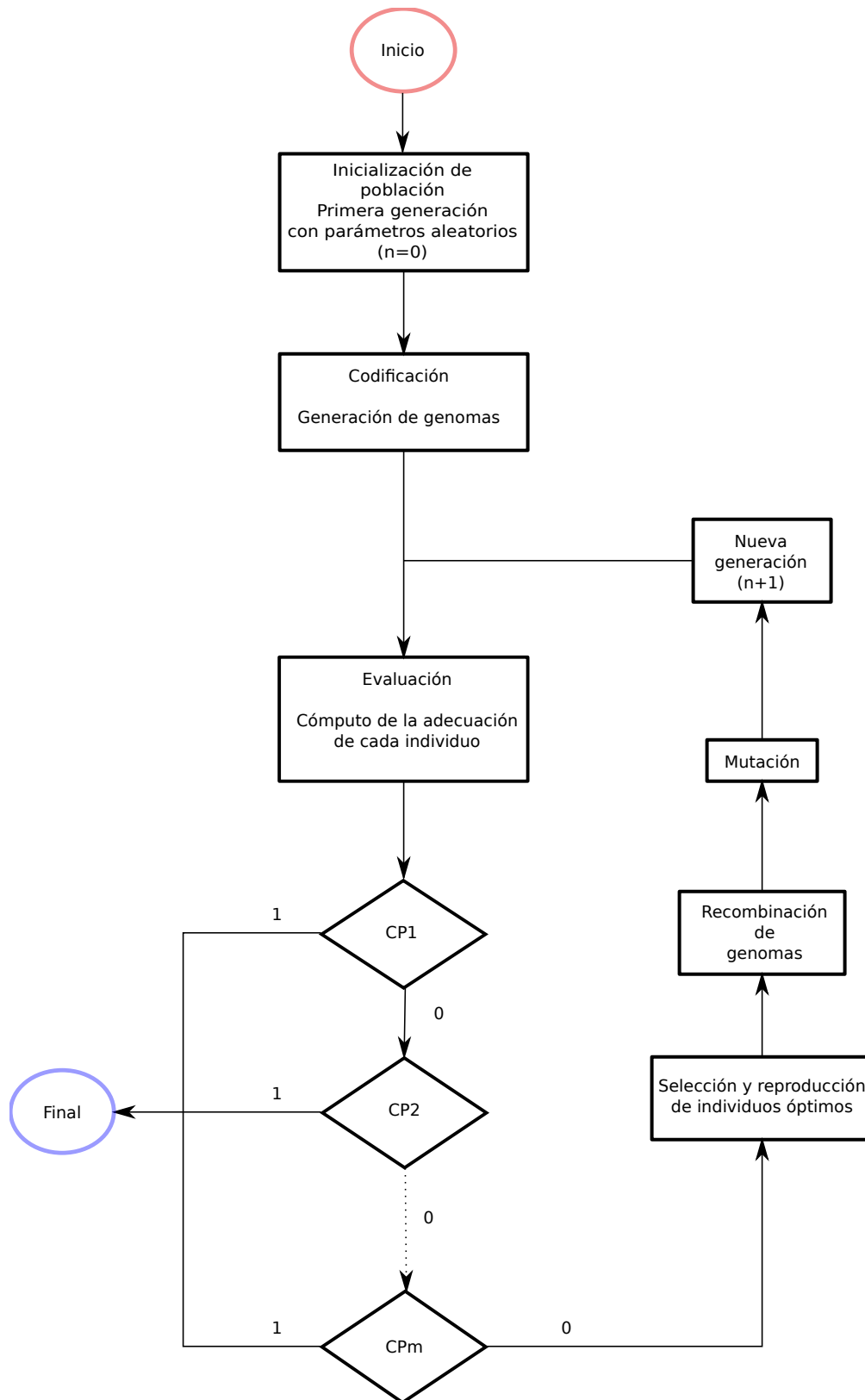


Figura 3.5: Diagrama de flujo para un algoritmo genético general. Las siglas “CP” indican un criterio de paro en específico (por ejemplo, máximo número de generaciones, adecuación del individuo más apto o adecuación promedio por encima de un umbral, etc.). Creado por el autor.

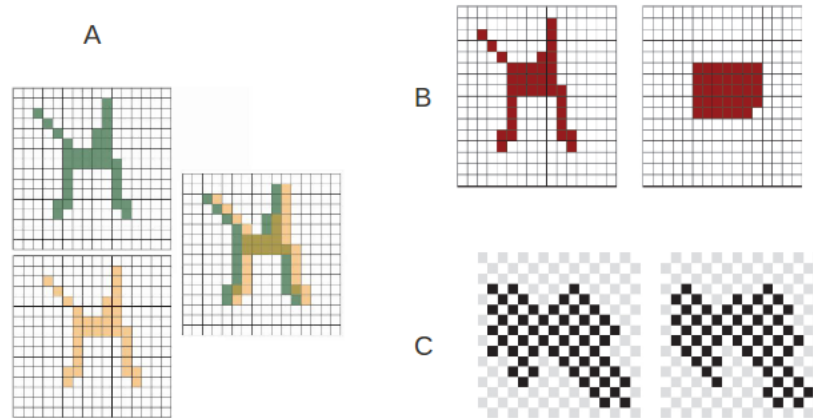


Figura 3.6: Algunos casos de error en comparaciones no morfológicas. El caso A muestra dos imágenes con la misma forma pero muy diferentes según una métrica pixel a pixel; el caso B muestra dos imágenes que serían iguales para una métrica que midiera áreas; el caso C es otro ejemplo patológico en el que una métrica no morfológica fallaría totalmente. Imágenes tomadas de [56].

aplicadas y el resultado mismo de la clasificación. En la figura 3.6 se muestran algunos de los posibles casos que pueden conducir al error al momento de calibrar un modelo con métricas que no sean sensibles a la forma.

Para mejorar la resolución del modelo se introdujo una métrica multiescala modificada a partir de la propuesta por Fidel Serrano [56]. La métrica original está pensada para un modelo de crecimiento urbano en el que hay una sola cobertura evaluada y consiste básicamente en dos partes:

1.- Una métrica que toma en cuenta diferencias en proporción de áreas ocupadas por cada categoría en varias escalas diferentes sobre un mismo par de mapas Ω_1 y Ω_2

Primero, para el mapa completo, se hace una comparación que nos da una métrica $D(\Omega_1, \Omega_2) = I(\Omega_1, \Omega_2)/N(\Omega_1)$, donde $N(\Omega_1)$ es el número total de celdas en Ω_1 y $I(\Omega_1, \Omega_2)$ es el número de celdas que son iguales en Ω_1 y Ω_2 .

Después se definen m particiones de Ω_1 y Ω_2 en k_j ventanas no superpuestas para cada j , con $0 < j \leq m$ y $k_j \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$, donde $(k_l < k_m) \iff (l < m)$ y la métrica para cada partición será $D_j(\Omega_1, \Omega_2) = \left[\sum_{i=1}^{k_j} I_j(P_{1,i}, P_{2,i})/N_j(P_{1,i}) \right] / k_j$, donde $P_{1,i}$ y $P_{2,i}$ son las i -ésimas ventanas de cada partición en Ω_1 y Ω_2 , respectivamente, $I_j(P_{1,i}, P_{2,i})$ es el número de celdas con el mismo valor en $P_{1,i}$ y $P_{2,i}$ para la j -ésima partición y $N_j(P_{1,i})$ es el número total de celdas en $P_{1,i}$ para la j -ésima partición. Cada métrica obtenida según

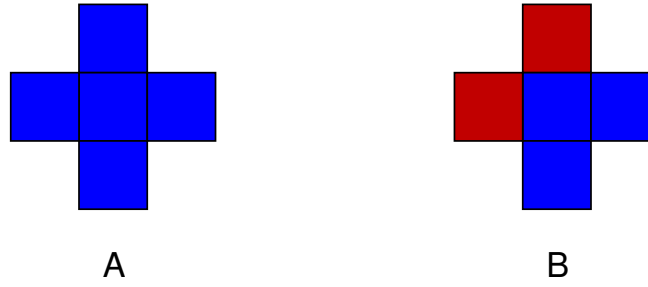


Figura 3.7: Diferencia entre celdas centrales de borde e interiores. A. Celda interior; B. Celda de borde.

la partición contribuye a la métrica multiescala en una fracción determinada. A esta fracción le llamaremos w_j , el peso de la partición j a en la métrica final, con la propiedad de que $\sum_{j=0}^m w_j = 1$. Por último hacemos $D_0(\Omega_1, \Omega_2) = D(\Omega_1, \Omega_2)$ y entonces la métrica multiescala estará dada como: $\Delta(\Omega_1, \Omega_2) = \sum_{i=0}^m w_i D_i$. Es claro que $0 \leq \Delta(\Omega_1, \Omega_2) \leq 1$, además tendrá el valor de 0 cuando las imágenes sean completamente diferentes y 1 cuando sean iguales, por lo que no es formalmente una métrica pero en la literatura se define así. Para ser métrica esta propiedad debería de estar invertida, lo cual se logra haciendo $1 - \Delta(\Omega_1, \Omega_2)$, pero por conveniencia se mantiene esta definición.

En lenguaje menos formal, lo que hace esta métrica es comparar pedazo por pedazo los mapas bajo distintas divisiones y después toma la suma de las calificaciones para cada subdivisión con coeficientes o pesos que indican su contribución, es decir, la media ponderada de las distintas escalas.

2.- Una métrica de borde que se calcula comparando el total de celdas de borde en ambos mapas, es decir, de aquellas celdas cuya vecindad de von Neumann contiene celdas con un valor diferente. Análogamente se define una celda interior como aquella en la que todas las celdas de su vecindad de von Neumann tienen el mismo valor (ver figura 3.7). Formalmente:

$$\beta(\Omega_1, \Omega_2) = 1 - |(B(\Omega_1)/N(\Omega_1) - B(\Omega_2)/N(\Omega_2))|$$

donde $B(\Omega_1)$ y $B(\Omega_2)$ son el número de celdas de borde para los mapas Ω_1 y Ω_2 , respectivamente, y $N(\Omega_1)$ y $N(\Omega_2)$ son el número de de celdas totales para cada mapa.

Al igual que en el caso anterior $0 \leq \beta(\Omega_1, \Omega_2) \leq 1$, donde el valor en 1 se alcanza cuando la cantidad de celdas de borde en ambos mapas es igual y el valor de 0 ocurre cuando todas las celdas son de borde en un mapa y ninguna celda es de borde en el otro.

Con estas dos métricas, la métrica multiescala con borde para una sola categoría queda como:

$$\Theta(\Omega_1, \Omega_2) = \sqrt{(\Delta(\Omega_1, \Omega_2) * \beta(\Omega_1, \Omega_2))}$$

Y con las propiedades de las métricas que le componen $0 \leq \Theta(\Omega_1, \Omega_2) \leq 1$, siguiendo el mismo comportamiento que en las dos métricas anteriores.

Métodos.

4.1. Clasificación de coberturas

El nivel de procesamiento del material utilizado corresponde al 2A de SPOT, el cual involucra la corrección radiométrica y geométrica de los datos. Además de lo anterior, este nivel de procesamiento incluye una georreferenciación sin puntos de control, la cual es útil para la superposición referencial de mapas pero requiere de correcciones a través de un proceso de registro, tanto para asegurar la máxima coincidencia de píxeles entre las coberturas obtenidas en la serie de tiempo como para la alineación de vías de comunicación y otras capas vectoriales.

Las fechas que se eligieron para la serie de tiempo corresponden a una distancia temporal de aproximadamente 5 años (2004 - 2009), aprovechando la disponibilidad del Conteo Poblacional en el 2005 [6] y el Censo de Población y Vivienda para el 2010 [5], los cuales se encuentran disponibles para su descarga en las direcciones indicadas dentro de las referencias. Además de lo anterior, se dio prioridad al material correspondiente al sensor SPOT 5 para evitar incluir datos de otros sensores, a decir, SPOT 4, que pudieran elevar la incertidumbre. En el cuadro 4.1 se presenta la descripción del material fotográfico utilizado.

4.1.1. Preparación de las Imágenes

El área de estudio abarca dos escenas de SPOT 5, por lo que fue necesario hacer un mosaico para cubrirla en su totalidad, sin embargo, para reducir la introducción de errores debido a interpolaciones, el pegado de las imágenes se dejó como un paso posclasificadorio y el proceso de clasificación se realizó de manera independiente para cada imagen. Como única excepción, se realizó un mosaico preclasificadorio para el material correspondiente al año 2009 usando una imagen con un año de diferencia (2008), pues dicho material presentó una gran cantidad de nubes en algunas zonas cercanas a la costa, especialmente en la región sureste

Momento	Fecha	Resolución	Bandas	Sensor	Procesamiento	Tipo
2004	15/02/04	10 metros	4	SPOT 5	2A	Multiespectral
2004	07/03/04	10 metros	4	SPOT 5	2A	Multiespectral
2004	15/02/04	2.5 metros	1	SPOT 5	2A	Pancromática
2004	07/03/04	2.5 metros	1	SPOT 5	2A	Pancromática
2008	26/02/08	10 metros	4	SPOT 5	2A	Multiespectral
2008	26/02/08	2.5 metros	1	SPOT 5	2A	Pancromática
2009	12/04/09	10 metros	4	SPOT 5	2A	Multiespectral
2009	24/01/09	10 metros	4	SPOT 5	2A	Multiespectral
2009	12/04/09	2.5 metros	1	SPOT 5	2A	Pancromática
2009	24/01/09	2.5 metros	1	SPOT 5	2A	Pancromática

Cuadro 4.1: Características de las imágenes empleadas como insumo de clasificación (multiespectrales) y como apoyo visual (pancromáticas)

del área de estudio, por lo que fue necesario hacer un proceso de limpieza retirando las áreas sin información (nubes y sus sombras) mediante una máscara generada a partir de vectoriales construidos deliniando áreas usando el módulo de GRASS v.digit.

Para optimizar la correspondencia espacial de la información entre momentos en la serie de tiempo, se realizó un proceso de registro, el cual consiste en la elección de puntos de referencia en ambas imágenes, los cuales corresponden a elementos conspicuos e invariantes en el tiempo (juntas de caminos y algunos edificios en su mayoría) que posteriormente son utilizados para ajustar la información según un modelo de superficie determinado.

Para caracterizar las firmas espectrales de cada cobertura se seleccionaron *áreas de interés* utilizando un criterio basado en puntos de control en campo, información estadística por banda y reconocimiento visual auxiliado por imágenes pancromáticas a 2.5 metros de resolución espacial correspondientes a las mismas fechas de cada imagen multiespectral. Ya que las fechas elegidas corresponden a la temporada seca, es posible diferenciar las coberturas caducifolias y subcaducifolias mediante su nivel de respuesta a infrarrojos.

Se eligieron las siguientes categorías tomando en cuenta posibles diferencias de comportamiento dinámico, además de su separabilidad espectral:

Humedales (Vt1) Corresponde a los humedales de la región, que incluyen a los manglares, tulares, popales y otros tipos de vegetación asociada a cuerpos de agua.

Vegetación subcaducifolia (Vt2) Aquí se incluyen las zonas cubiertas por vegetación subcaducifolia de acuerdo a los puntos tomados en campo y a su respuesta espectral. Entre los tipos de vegetación que caen dentro de esta categoría están los encinares, las selvas medianas subcaducifolias y las zonas de vegetación riparia.

Vegetación caducifolia (Vt3) En esta cobertura se incluyen todos los tipos de vegetación natural con baja respuesta espectral a infrarrojos, entre los cuales están los matorrales xerófilos y la selva baja caducifolia.

Agrícola (Dt1). En esta clase de cobertura entran todos los cultivos, estacionales o de riego, activos o en barbecho.

Cobertura abierta (Dt2) Esta cobertura corresponde principalmente a zonas con evidencia de degradación debido al desmonte parcial o total de la vegetación nativa sin la presencia de cultivos, con o sin parcelamiento. Aquí se incluyen las zonas de potreraje y unas cuantas zonas de clareamiento visible cuya actividad no fue determinada.

Construcciones (Dt3) Aquí se presentan las áreas de poblados y algunas edificaciones aisladas de mayor tamaño situadas en su mayoría sobre la línea costera.

Sin cobertura (Sc) Las superficies de arena, lecho de río y zonas rocosas se incluyen en esta cobertura.

Agua (A) Corresponde a los cuerpos de agua presentes en las imágenes.

Con la intención de mejorar los resultados de la clasificación, se aplicó una transformación de componentes principales a las bandas de las imágenes multiespectrales utilizadas usando el módulo **i.pca** de GRASS. El resultado de este análisis son nuevas imágenes que tienen la ventaja de ser ortogonales, es decir, el coeficiente de correlación entre cualquier par de imágenes es cero, con lo que se reduce la redundancia informacional. Este proceso es utilizado usualmente para reducir el número de dimensiones en el espacio de variables al elegir un subconjunto propio del total de componentes que explique la mayor parte de la varianza, sin embargo, para este procedimiento no se eliminaron componentes ya que al realizar pruebas con un número menor al total de las variables de entrada se obtuvieron resultados pobres.

4.1.2. Clasificación

Usando las áreas de interés creadas para cada categoría, se realizó una clasificación supervisada inicial por máxima verosimilitud con lo que se obtuvieron mapas de verosimilitud para cada clase de cobertura usando el módulo **i.maxlik** de GRASS. Los mapas obtenidos fueron transformados a probabilidades reales con la intención de poder utilizar los valores con reglas de probabilidad usando la suma y producto como operaciones. Posteriormente se utilizaron estas variables para construir un árbol de decisión con criterios probabilísticos.

Al utilizar el producto de las probabilidades para cada momento en la serie de tiempo en las coberturas naturales se garantiza la máxima coincidencia de las mismas en el tiempo, es decir, se evita considerar cambios temporales inverosímiles (por ejemplo, pixeles que pasan de selva baja a selva mediana de un año al otro). Por otro lado, tomar el producto de dichas probabilidades como un criterio de clasificación también agrega robustez a las clasificaciones ya que implica una pertenencia conjunta bajo mediciones independientes del mismo espacio.

Por último, se realizaron correcciones manuales a las clasificaciones basadas en los puntos de control y auxiliadas por inspecciones visuales sobre las imágenes pancromáticas correspondientes a las fechas de las imágenes multiespectrales.

Con las clasificaciones obtenidas se realizó un proceso de validación empleando 200 puntos obtenidos en campo con los cuales se construyeron las matrices de confusión que se incluyen en los resultados. Este tipo de herramienta se emplea para calcular la incertidumbre de un mapa en vez de utilizar un cálculo global y consiste en el conteo de coincidencias y diferencias de una muestra control con respecto a la clasificación temática. La idea es que el error se calcule sin sesgo hacia las coberturas que ocupan la mayor proporción del paisaje. En la figura 4.2 se muestra la estructura de una matriz de confusión hipotética.

		A		Totales
		0	1	
B	0	a	b	B_0
	1	c	d	B_1
	Totales	A_0	A_1	n

Cuadro 4.2: Matriz de confusión hipotética para dos categorías (modificado de [13])

4.2. Una métrica morfológica combinada.

En los antecedentes se construyó una métrica espacial que permite calibrar los modelos a varias escalas y además reconocer similitudes morfológicas. Para poder adaptar esta métrica a varias coberturas únicamente es necesario modificar la métrica de borde como se explica a continuación, ya que la métrica multiescala tiene un planteamiento suficientemente general para su extensión directa:

Sea CAT el conjunto de todas las categorías en el mapa de uso de suelo, entonces para

toda $c \in CAT$ se define $\beta_c(\Omega_1, \Omega_2)$ como la métrica de borde sobre la categoría c (es decir que esta métrica es la misma métrica de borde usando una categoría a la vez) y

$$\Upsilon(\Omega_1, \Omega_2) = \left[\sum_{c \in CAT} \beta_c(\Omega_1, \Omega_2) \right] / |CAT|$$

donde $|CAT|$ es la cardinalidad del conjunto CAT , es decir, el número de clases de cobertura, como la métrica de borde multicobertura. Sustituyendo $\beta(\Omega_1, \Omega_2)$ por $\Upsilon(\Omega_1, \Omega_2)$ en la fórmula de la métrica de Serrano obtenemos una *métrica multiescala con borde multicobertura*.

En el presente trabajo se utilizó una estrategia diferente para la combinación de las métricas y el manejo de información a disintas escalas. En primer lugar, para cada escala se calcularon dos métricas diferentes inspiradas en la métrica anterior. La primera métrica captura las proporciones en área que ocupa cada categoría en el mapa para cada escala. En general, dados dos mapas M_1, M_2 se calculan las proporciones ocupadas por cada categoría con respecto al total:

$$P_j(M_i) = A_{i,j} / At_i$$

donde $P_j(M_i)$, $A_{i,j}$ y At_i son la proporción con respecto al total de la j -ésima categoría, el área ocupada por la j -ésima categoría y el área total para el i -ésimo mapa. La métrica de áreas que se definirá balancea las diferencias por cada categoría con el objetivo de evitar sesgos hacia el peso de categorías que ocupan las mayores proporciones en el mapa. Con esto en mente, definimos la similitud proporcional por categoría (s_j) como:

$$s_j(M_1, M_2) = \begin{cases} 1 & \text{si } P_j(M_1) - P_j(M_2) = 0 \\ 1 - \text{abs}([P_j(M_1) - P_j(M_2)] / [P_j(M_1) + P_j(M_2)]) & \text{si } P_j(M_1) - P_j(M_2) \neq 0 \end{cases}$$

donde $\text{abs}()$ es el valor absoluto.

Con estas métricas por categoría se define la métrica global por áreas ($A_G(M1, M2)$) como

$$A_G(M1, M2) = \sum_{j \in CAT} s_j(M_1, M_2) / |CAT|$$

El rango de cada función s_j es el intervalo $[0, 1]$, de manera que la métrica global tiene el mismo rango por construcción. La importancia de que cada categoría se califique de forma normalizada evita que la calibración se centre sobre un tipo de cobertura en particular,

de manera que para que dos mapas sean similares bajo este criterio, es necesario que la distribución en áreas para cada categoría sea muy similar. Ahora, dado que M_1 y M_2 son mapas arbitrarios, la definición anterior permite su extensión directa a cualquier escala, únicamente variando el nivel de "zoom" para los mapas comparados. Para introducir la multiescaridad, se realiza un proceso similar al descrito para la métrica multiescala de Serrano, en el que se calcula el índice de similitud global para cada porción en las particiones. Posteriormente se obtiene el promedio de los índices por cada escala o nivel de fragmentación de la información y se obtiene la media ponderada de las similitudes por escala. La ponderación, al igual que en la construcción de la métrica anterior, depende de la importancia de cada escala para el reconocimiento de patrones según el caso de estudio, por lo que se piensa introducir a futuro como un parámetro modificable en la aplicación. Como ecuación, la métrica multiescala de áreas proporcionales (\textcircled{a}) queda de la siguiente manera:

$$\textcircled{a}(M_1, M_2) = \left(\sum_{z \leq Ne} \left(\sum_{j \in P_z} A_G(M_{1,j}^z, M_{2,j}^z) \right) / |P_z| \right) / Ne$$

El componente morfológico de la fórmula se obtuvo integrando el criterio de compacidad discreta para dos dimensiones introducido por Ernesto Bribiesca [16]. La compacidad discreta, según la definición más actual que presenta el mismo autor [17], es una medida insensible a las transformaciones rígidas de rotación y traslación, así como a las isotopías, como la reducción o ampliación de una misma forma, atributos que son deseables si lo único que importa en la comparación es la forma pura. No obstante, en nuestro caso, es importante que la métrica considere el tamaño de los objetos generados como un atributo a calificar. Por esta razón se utilizó la versión de compacidad discreta no normalizada más antigua, la cual consiste directamente en el *perímetro de contacto* de las figuras, la cual consiste meramente en la longitud total de los bordes compartidos por pixeles de la misma clase (color) en una imagen. Esta medida está además relacionada con el perímetro de un objeto construido con pixeles a través de la siguiente ecuación:

$$P = 4 * aN - 2P_c$$

donde P es el perímetro de la figura, a es el área de un pixel según la resolución, N es el número total de pixeles en la figura y P_c es el perímetro de contacto de la misma. En la figura 4.1 se muestran ejemplos de figuras que tienen perímetros de contacto diferentes con la misma área.

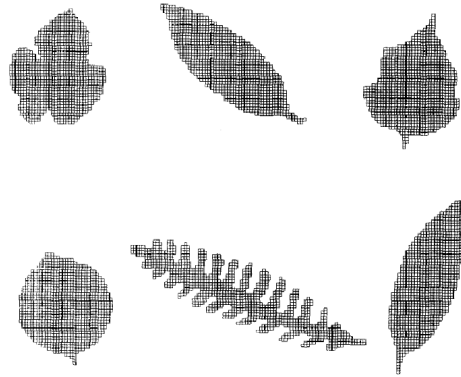


Figura 4.1: Figuras diferentes construidas con la misma área (900 píxeles). Tomado de [16]

La construcción de la compacidad discreta para varias categorías sigue exactamente el mismo razonamiento que el utilizado en la métrica multiescala de áreas proporcionales, obteniendo inicialmente comparaciones por categoría escaladas al intervalo $[0, 1]$, las cuales son promediadas sobre el número de categorías, obteniendo así una calificación para cada mapa en cuestión. Estos resultados son promediados nuevamente sobre el número de fragmentos en una partición particular para después obtener una media ponderada de las distintas escalas. Si llamamos a la métrica de compacidad discreta $CD(M_1, M_1)$, una propuesta de métrica mixta (MM) es:

$$MM(M_1, M_2) = \sqrt{(\textcircled{a})(M_1, M_2) * C_d(M_1, M_1)}$$

A pesar de que puede ser más sencilla su interpretación, esta forma de combinar las métricas no liga el valor de similitud de cada categoría a cada escala de acuerdo a los índices empleados entre dos mapas, por lo que se optó por hacer la combinación de las métricas desde los primeros pasos de la construcción, es decir, para una escala z y una categoría j en particular se define

$$mm_{i,j}^z(M_1, M_2) = \sqrt{(s_{i,j}^z(M_1, M_2) * cd_{i,j}^z(M_1, M_2))}$$

donde $s_{i,j}^z$ y $cd_{i,j}^z$ son respectivamente el índice de similitud por áreas y el índice de similitud por compacidad discreta para la j -ésima categoría en el i -ésimo elemento de la partición z . Con las métricas particulares combinadas, se construye la métrica mixta (\textcircled{m}) que se utilizó en la implementación de forma análoga a las construcciones multiescala anteriores: Si hacemos

$mm_G(M1, M2) = \sum_{j \in CAT} mm_j(O_1, O_2)/|CAT|$ para cualesquiera objetos O_1, O_2 entonces la definición está dada por la igualdad

$$\textcircled{m}(M_1, M_2) = \left(\sum_{z \leq Ne} \left(\sum_{j \in P_z} mm_G(M_{1,j}^z, M_{2,j}^z) \right) / |P_z| \right) / Ne$$

La combinación de las métricas al nivel que se plantea en esta segunda versión obliga a que el óptimo de calibración esté en un modelo que hace buenas predicciones tanto en términos de área como en términos de forma, para cada categoría en específico y para cada escala de análisis (de acuerdo a la ponderación). En la primera versión, es posible que alguna de las categorías tenga valores subóptimos de compacidad pero buenas aproximaciones en cuanto a proporción de áreas, una cualidad que se diluye al hacer la combinación al final de la construcción.

4.3. Implementación

Todo el código de la herramienta fue desarrollado dentro del API de GRASS, cuyo código está escrito principalmente en el lenguaje estructurado *C*, el cual compone también la mayor parte del código de la herramienta. Algunas funciones fueron programadas en *C++* para implementar la biblioteca de algoritmos genéticos GALib [64]. No obstante, esta parte del código será eliminada por una implementación propia en *C*. Además se usaron algunos programas escritos en *python* y *shell* para la manipulación automatizada de los mapas. Para el algoritmo de RNA's se empleó la biblioteca FANN [47], la cual se eligió por homogeneidad del código (pues también está escrita en *C*) desempeño, flexibilidad y por su capacidad de integración con otros lenguajes de programación.

4.3.1. Proceso de modelación

El proceso básico para la generación de mapas predictivos bajo cualquiera de los algoritmos programados consiste en dos partes principales: calibración y simulación.

Durante el proceso de calibración, se emplearon las dos clasificaciones temáticas generadas, además de variables geofísicas, demográficas y ambientales relacionadas con la dinámica de transformación. Se trata de un esquema supervisado en el que se presentan

patrones de entrada que consisten en la categoría de suelo en el mapa más antiguo y el perfil de variables correspondiente a cada pixel. Al ser alimentado con estos patrones, el modelo produce mapas de uso de suelo que se comparan con la clasificación más tardía. El proceso de entrenamiento consiste en minimizar las diferencias entre las salidas del modelo y las salidas esperadas, las cuales se miden pixel a pixel o mediante métricas sensibles a la forma.

Una vez calibrado, el modelo puede ser usado para producir mapas predictivos con entradas diferentes. El caso más simple de simulación consiste en usar el mapa de uso de suelo tardío y las variables correspondientes a este momento como entradas. La salida del modelo en este caso es un mapa temático de uso de suelo con las coberturas de acuerdo a los cambios que se predicen.

Para generar más momentos en la serie de tiempo se usa un esquema recursivo sobre las salidas sucesivas del modelo, es decir, dado un momento t en la serie de tiempo, un mapa de uso de suelo (generado por el modelo o de datos reales) asociado a ese momento C_t y una n-tupla de variables \bar{V}_t , la cobertura correspondiente al momento $t + 1$ es el resultado de aplicar el modelo al vector de mapas $\langle C_t, \bar{V}_t \rangle$. Si llamamos μ al modelo y lo abstraemos como función, esto se resume en:

$$\mu(\langle C_t, \bar{V}_t \rangle) = C_{t+1}$$

Bajo este esquema, el modelo es en realidad un SAG con reglas de transición determinadas por RNA's o por otros algoritmos implementados. Cada algoritmo programado presenta características distintas en cuanto a cómo ocurren los procesos mencionados. En el caso del algoritmo que emplea RNA's, la comparación de salidas se realiza pixel a pixel y se usa el algoritmo de retropropagación como método de calibración.

El método de comparación morfológica, así como el entrenamiento con algoritmos genéticos fueron implementados en el algoritmo de autoría propia que se describe en el siguiente apartado. Las particularidades para la aplicación de cada algoritmo en el módulo, así como una descripción de su funcionamiento se incluyen en el apéndice A1.

Un algoritmo de aprendizaje basado en operadores lógicos multigrados.

El aprendizaje bajo este algoritmo está basado en propiedades sencillas de los operadores lógicos (\vee y \wedge , "o" e "y", respectivamente) sobre condicionales evaluados en las variables descritas. El uso de umbrales para modelar cambio de uso de suelo es algo común desde

los inicios de esta disciplina, por lo que su utilidad está probada en dicho campo. La idea de combinar los operadores y la manera en la que esto se realiza en el algoritmo es sencilla y transparente. Básicamente consiste en hacer "contínuos", o más bien multigraduados, los operadores mencionados, de tal forma que en cada extremo de la graduación se obtenga el comportamiento de uno de ellos. Esta idea surgió de la imposibilidad de decidir qué operador usar al momento de hacer fórmulas de umbrales como la siguiente:

$$(x_0 \leq \xi_0)op(x_1 \leq \xi_1)op\dots(x_{n-1} \leq \xi_{n-1})op(x_n \leq \xi_n)$$

donde op es cualquiera de los operadores \vee o \wedge , x_j es el valor de la j -ésima variable y ξ_j es el valor del j -ésimo umbral correspondiente a la i -ésima relación de cambio evaluada $\forall i, j$ ¹. La elección de un operador sobre una fórmula de este tipo es determinante en su comportamiento ya que por un lado, la conjunción resulta ser un criterio demasiado estricto en muchos casos, de tal forma que los modelos generados tienden a ser conservadores, y por otro lado, cuando se emplea la disjunción se obtiene un comportamiento dual, es decir, la formación de criterios laxos que tienden a sobreestimar. Por otro lado, la forma en la que cada factor influye sobre el fenómeno estudiado es muy variable en el espacio, además de que existen, como ya se mencionó, fuentes importantes de incertidumbre espacial, por ello, aun una regla con combinaciones específicas de dichos operadores, resulta ser altamente particular en sus predicciones y sensible al ruido informacional. Como alternativa se propone el siguiente operador que primero transforma valores de verdad booleanos en una asignación de verdad multivaluada que tiende a ser difusa conforme aumenta el número de fórmulas que se incluyen, para después hacer una nueva transformación a valores booleanos para su interpretación en la lógica clásica:

Se define inicialmente el operador $\Xi : P(\Gamma) \rightarrow [0, 1]$, donde $P(\Gamma)$ es la colección de todos los posibles conjuntos finitos de fórmulas de umbral (un caso particular de fórmula booleana) como:

$$\Xi(G) = (\sum_{g \in G} V(g)) / |G|$$

donde G es un conjunto de fórmulas de umbral, g es una fórmula que pertenece a dicho

¹Se eligió este tipo de fórmula de umbral en vez de la forma $x_j > \xi_j$ para simplificar el análisis de los umbrales calibrados.

conjunto, $V(g)$ es el valor de verdad de dicha fórmula (el cual toma el valor de 1 cuando es verdadera y 0 en otro caso) y $|G|$ es el número de elementos en $|G|$. Para entender el comportamiento de este operador se puede tomar el siguiente ejemplo: Supongamos que $|G| = 10$, si todas las fórmulas evaluadas resultan ser verdaderas, entonces

$$\Xi(G) = (\sum_{g \in G} 1)/10 = 10/10 = 1$$

y si solo una fórmula del total resulta ser verdadera obtenemos

$$\Xi(G) = 1/10 = 0,1$$

. Con esta construcción únicamente resta aplicar un umbral al operador para asignarle valores booleanos, con lo que para cada número x en el intervalo $[0, 1]$, se define $\Xi_x : P(\Gamma) \rightarrow 2$ como:

$$\Xi_x(G) = \begin{cases} 1 & \text{si } \Xi(G) \leq x \\ 0 & \text{si } \Xi(G) > x \end{cases}$$

Esta construcción fue aplicada para evaluar todas las variables al relacionarlas con la categoría ocupada por un pixel en el futuro a partir de datos actuales. Esto permite usar todas las variables a la vez sin preocuparse por la elección de las mismas en cada criterio de asignación a las categorías de uso de suelo futuras. Es importante notar dos casos importantes que nos hablan de su naturaleza, usando el ejemplo con $|G| = 10$:

1. Si $x = 1$ entonces $\Xi_x(G) = \bigwedge G$, la conjunción (“y”) generalizada.
2. Si $x = 0.1$ entonces $\Xi_x(G) = \bigvee G$, la disjunción (“o”) generalizada.
3. Si $x = 0$ entonces $\Xi_x(G)$ es contradicción, es decir, es falsa en cualquier evaluación²

De esta manera obtenemos una herramienta que nos permite hacer combinaciones de conjunciones y disjunciones de formulas, a la vez que no se especifica la identidad de aquellas cuya asignación sea verdadera, por lo que si $x = 0,5$ lo unico que se sabe es que necesario que al menos la mitad de las formulas sean verdaderas para que al operarlas con $\Xi_{0,5}$ se obtenga el valor de verdadero. No especificar las formulas que son verdaderas en cada evaluación es una

²En este caso, la transición que está relacionada con la evaluación se anula, de manera que se identifica una transición no permitida.

característica interesante que le permite lidiar con incertidumbre en los datos mediante una especie de criterio lógico "democrático" con distintos esquemas de decisión (no necesariamente el de "la mitad más 1 obtiene el triunfo"). Con esta definición, se usaron algoritmos genéticos para programar un método que encuentra los valores óptimos de umbral, tanto para el conjunto fórmulas (cada una con variables en los factores elegidos para explicar el cambio de uso de suelo) empleado como argumento de Ξ_x , como para el valor de x , que es también un umbral.

Además de su simplicidad, un atractivo importante del algoritmo es que, una vez calibrados los pesos usando algoritmos genéticos, permite hacer análisis de la importancia relativa de cada variable a través de la observación de los umbrales obtenidos. Umbrales altos indicarán propiedades restrictivas de las variables con respecto a las transiciones dadas y de forma recíproca, umbrales bajos indican que la variable en cuestión no es determinante en el tipo de transición. Esto se hará más claro al momento de presentar los resultados.

La calibración o entrenamiento bajo este algoritmo se encuentra a cargo de un algoritmo genético que actúa sobre los umbrales de cada evaluación que determinará una cierta transición entre categorías de uso de suelo, así como el umbral (x) que determina el comportamiento del operador. La población del algoritmo genético se compone de diferentes combinaciones de umbrales, cada una de las cuales induce una salida o propuesta de mapa de acuerdo a las variables de entrada y un mapa de uso de suelo temprano (mapa de uso de suelo 2004). Las salidas de cada individuo son evaluadas al compararlas con una referencia actual conocida de uso de suelo (mapa de uso de suelo 2009) mediante las métricas no puntuales mencionadas en los antecedentes.

4.4. Métricas del paisaje

Para analizar las propiedades cualitativas de un paisaje, es común utilizar métricas que se refieren a las características de la distribución de coberturas en la extensión analizada. Estas métricas intentan cuantificar, a grandes rasgos, tres aspectos generales: la fragmentación y conexidad del paisaje; la distribución proporcional de coberturas; y la forma, o de manera más particular, la fractalidad de los fragmentos que componen las áreas ocupadas por cada categoría. Cabe mencionar que el objetivo principal de este trabajo no es dar una caracterización exhaustiva del paisaje contenido en el área de estudio por lo que para la elección de las métricas utilizadas se empleó un criterio de minimalidad en cuanto al cómputo

necesario y baja complejidad interpretativa.

4.4.1. Composición y diversidad.

Es común que en la literatura se usen métricas basadas en índices de diversidad, dominancia y riqueza. Las fórmulas que determinan estas métricas son básicamente las mismas que las usadas en estudios ecológicos no paisajísticos y reflejan una noción de composición del paisaje que es de utilidad en algunos casos. No obstante, la interpretación de un paisaje "diverso" es un tanto compleja en casos como el que se presenta en este trabajo. Esta dificultad interpretativa proviene de la noción de "diversidad paisajística" y su relación con la degradación ambiental ya que los ambientes con coberturas antrópicas pueden resultar ser más diversos en términos del equitatividad que un paisaje dominado por coberturas naturales³. Por esta razón no se midió diversidad y se decidió usar simplemente las proporciones ocupadas por cada cobertura con respecto al total del área de estudio como un indicador de composición:

$$p_i = n_i/N$$

donde n_i es el número de pixeles ocupado por la i -ésima clase y N es el número total de pixeles. Con estas proporciones es posible entender los cambios en terminos de la inflación de ciertas clases de cobertura y su relación con factores introducidos en las simulaciones.

4.4.2. Conexidad.

En este trabajo se emplearon dos indicadores de fragmentación o conexidad del paisaje que se incluyen dentro del módulo **r.le** para análisis de estructura del paisaje en GRASS: el número total de parches por categoría; y el tamaño relativo del parche de mayor tamaño por categoría. El primero de los indicadores mencionados puede reflejar directamente cambios en el grado de fragmentación del paisaje, no obstante, puede tener la desventaja de que la disminución o aumento de este número puede deberse a dos razones que son duales entre sí: el paisaje ha sido transformado, eliminando por completo parches de vegetación (lo que disminuiría el número de parches) o fragmentando los parches en unidades de menor tamaño (lo que aumentaría el número de parches); o el paisaje ha pasado por un proceso de regeneración en el que los parches de vegetación crecen y se fusionan formando parches

³Un ejemplo claro de esta situación es un área conservada dominada por bosques templados monoespecíficos que se degrada integrando coberturas antrópicas.

más grandes (disminuyendo el número total de parches de vegetación), o crecen en número (al aparecer nuevas zonas de regeneración relativamente desconectadas, un proceso menos común, pero posible gracias a la dispersión a distancia de semillas, esporas o en general, de cualquier propágulo, ya sea de forma artificial o con dispersores naturales).

El segundo indicador se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$RS_i = LC_i / (p_i N)$$

donde RS_i es la métrica del tamaño relativo, LC_i es el número de píxeles en el parche más grande para la i -ésima cobertura, p_i es la proporción ocupada por la i -ésima cobertura y N es el número total de píxeles contenidos en el área estudiada. Este índice, a diferencia del anterior, toma valores en el intervalo acotado del 0 al 1, en donde la condición máxima está representada por el caso en el que un solo parche ocupa toda el área asignada a la categoría en cuestión. De nuevo, es posible pensar en ejemplos que eludan interpretaciones simplistas del indicador en el contexto de la degradación ambiental como una situación en la cual el parche de mayor tamaño se preserve a lo largo del tiempo, con la eliminación de otras zonas cubiertas con el mismo tipo de vegetación. Con el tiempo, la proporción que representa dicho parche sobre el total de su cobertura se incrementa, tendiendo a la unidad e indicando valores altos de conectividad, aunque se trate de un contexto de degradación creciente.

Esta diferencia entre conectividad y grado de conservación, manifestada por ambos índices, no es en realidad una desventaja importante, ya que su interpretación es auxiliada por otras características del paisaje, como el cambio en área de cada categoría. Un ejemplo simplista de cómo interpretar este índice combinado con la característica mencionada es: si el número de fragmentos para una cierta categoría crece y el área crece también, se trata de un proceso de regeneración "difusa", es decir, en parches, por otro lado, si el área ocupada por dicha categoría decrece, se trata de un proceso de degradación por fragmentación del hábitat. Se puede construir un ejemplo análogo para la disminución del número de parches.

4.4.3. Forma.

Para capturar esta característica paisajística e eligió una métrica alternativa muy común en ecología del paisaje: la dimensión fractal, definida por Mandelbrot en 1983 [39]. Este índice, de forma general, nos habla de qué tanto un objeto de dimensión topológica N llena un espacio de dimensión topológica superior. Su formulación proviene de la relación propuesta

por el mismo autor para el área y el perímetro:

$$A = (kP)^d$$

donde A es el área del objeto, P es el perímetro, d es la dimensión fractal y k es una constante que toma diferentes valores de acuerdo a la manera en la que se mide el perímetro [60]. La constante k es importante al momento de aplicar este índice a figuras de dos dimensiones compuestas por pixeles, ya que si se asume que $k = 1$, la forma en la que se mide el perímetro debe de corresponder al conteo de los pixeles perimetrales (no al perímetro que determinan sus lados). Si se considera el perímetro real de una figura formada por pixeles el valor de k debe ser 0.25 (la proporción de un lado con respecto al perímetro de un cuadrado).

4.5. Variables de entrada.

En el cuadro 4.3 se presentan las variables empleadas como entradas tanto para calibrar el modelo como para generar simulaciones, además de una descripción de cómo fueron construídas y en las figuras ?? y ?? se presentan los mapas generados. Estas variables fueron elegidas de acuerdo a un criterio bibliográfico, según su disponibilidad e inspecciones realizadas sobre los cambios observados en los dos momentos de la serie de tiempo. Todas las variables fueron reescaladas al intervalo $[-1,1]$ para coincidir con un dominio adecuado de acuerdo a la función de activación elegida para la red neuronal, la cual es una tangente hiperbólica con contradominio en el intervalo mencionado. Este mismo reescalamiento se usó en el método alternativo ya descrito.

Algunas de estas variables fueron generadas una sola vez y se consideraron estáticas a lo largo de la serie por falta de información, como se indica en la columna "Tipo" del cuadro referido. Otras variables fueron regeneradas después de cada iteración al depender de la salida del modelo o de algún factor que se consideró dinámico en las simulaciones (como las vías de comunicación). En cualquier caso, el proceso de generación se realizó por completo usando módulos de GRASS.

En todos los casos, para generar los mapas rasterizados a partir de la cartografía vectorial se empleó el módulo **v.to.rast**. A partir de los rásters generados, para el cálculo de las distancias se empleó el módulo **r.grow.distance** y el reescalamiento se logró mediante el módulo **r.mapcalc** para álgebra de mapas. Para calcular la pendiente y la orientación,

se usó el módulo **r.slope.aspect**. Para el trazo de vectoriales se emplearon las imágenes SPOT multiespectrales mencionadas como base, auxiliándose de las imágenes pancromáticas y capturando los trazos dentro del módulo **v.digit**

En el caso de la capa de infraestructura hídrica, hay ciertos vectoriales para los que se indica dentro de la descripción asociada a los archivos, que la infraestructura correspondiente se encuentra en proceso de construcción. Dado que esta información es anterior al periodo de análisis (2004-2009), se consideró que dichas instalaciones ya se encuentran en funcionamiento. De manera similar, los vectoriales indicados como “fuera de uso” en las cartas topográficas, fueron excluidos del análisis.

La variable de cercanía a la costa se incluye en algunos trabajos donde existe una línea costera, ya sea alrededor de un lago, laguna o mar, ya que se encuentra asociada a actividades recreativas y desarrollo inmobiliario por ser sitios apreciados según la “calidad de vista” [50]. Tal es el caso de los complejos hoteleros y los principales establecimientos humanos del área de estudio.

Las variables de vecindad pueden ser calculadas en tiempo real dentro del módulo o se puede aplicar como un mapa de entrada generado por una regla que determina un único valor asociado a la vecindad. Para la presente aplicación se optó por alimentar el modelo directamente con los mapas precalculados para disminuir el tiempo de procesamiento necesario para el cálculo “al vuelo” de las vecindades.

Dentro de las variables de vecindad, el radio de 6 celdas utilizado para generar los mapas de densidad de coberturas antropogénicas ha sido empleado en estudios similares aplicados a entornos urbanos con una manipulación ligeramente distinta. Este factor fue introducido en el modelo por White y Engelen para modelar el crecimiento de ciudades en 1996 [66], notando que las nuevas áreas transformadas aparecen generalmente en lugares donde ya existe algún tipo de transformación. En el presente estudio se empleó el promedio simple de la vecindad, la cual es una medida local de la densidad de transformación. La idea de usar un promedio sin ponderaciones (como usualmente se emplean) proviene de inspecciones a las distribuciones estadísticas de las celdas que sufrieron algún tipo de transformación en la serie de tiempo correspondientes a los mapas generados con las vecindades ponderadas y la densidad local no ponderada.

El cometido de introducir la RBCh-C como una variable continua, dada por distancias, y no de forma discreta, es el de representar de alguna manera la influencia de dicho objeto sobre las áreas circundantes. La idea de usar la distancia como medio de representación se

apoya en que se ha observado una tendencia de degradación en proporción inversa sobre este parámetro [53].

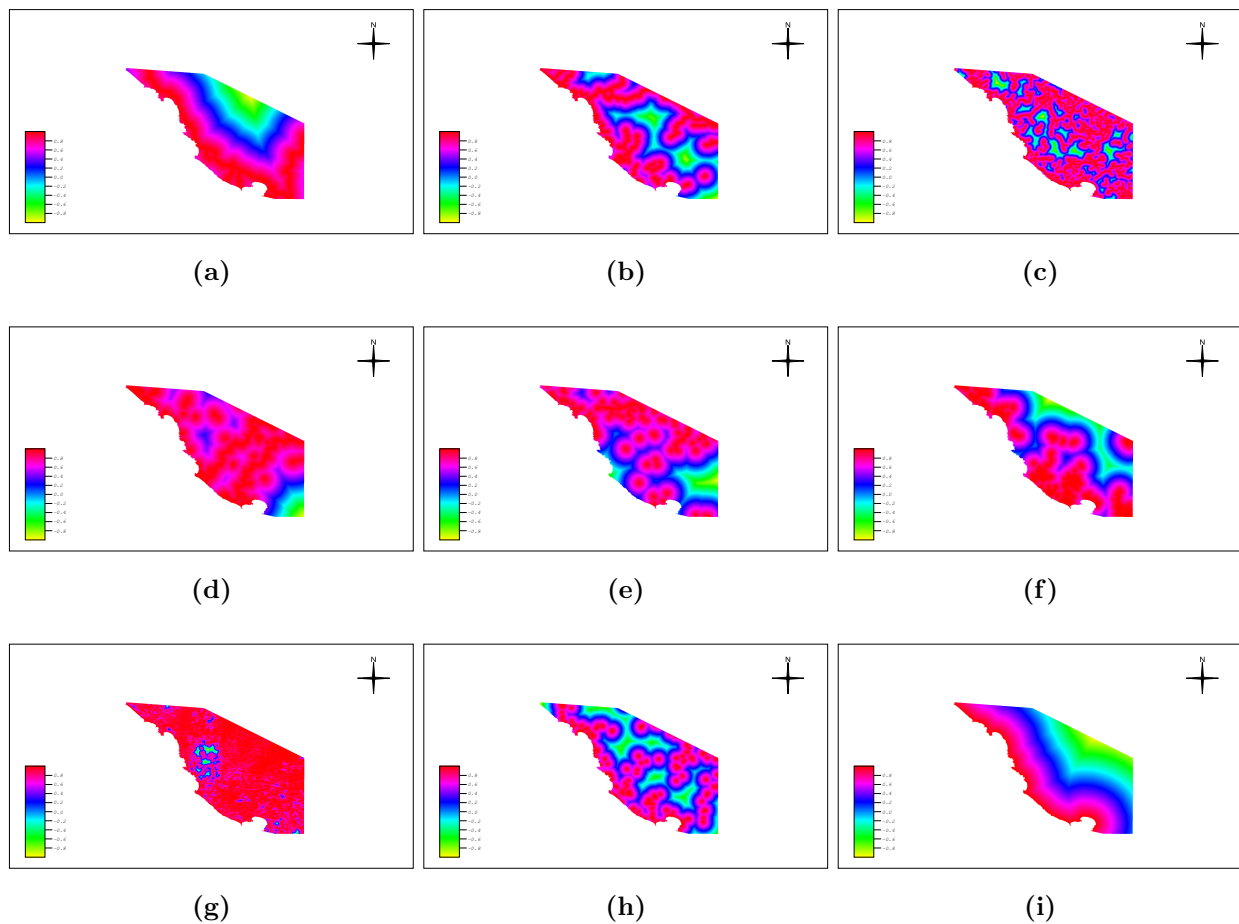


Figura 4.2: Mapas usados como insumo del modelo: (a) distancia a carreteras pavimentadas; (b) distancia a carreteras de terracería; (c) distancia a brechas; (d) distancia a cuerpos de agua perenne; (e) distancia a infraestructura hídrica; (f) distancia a parches de la categoría Dt1; (g) distancia a parches de la categoría Dt2; (h) distancia a parches de la categoría Dt3; (i) distancia a la costa.

El cálculo de la variable “sensibilidad” está basado en un razonamiento tipo “gravitatorio” de las localidades sobre el área de estudio, es decir, la influencia de una localidad sobre un pixel se supone directamente proporcional a su población total e inversamente proporcional al costo⁴ de trasladarse desde la localidad a dicho pixel. El módulo que realiza dicho cálculo en GRASS es **r.cost**, dada una superficie de costo o fricción. En el mapa de costo, cada celda

⁴El costo en este caso quiere decir la dificultad de llegar de un punto al otro en el paisaje de acuerdo a la topografía, pendiente, fricción, tipo de cobertura u otro parámetro representado en una capa de información geográfica

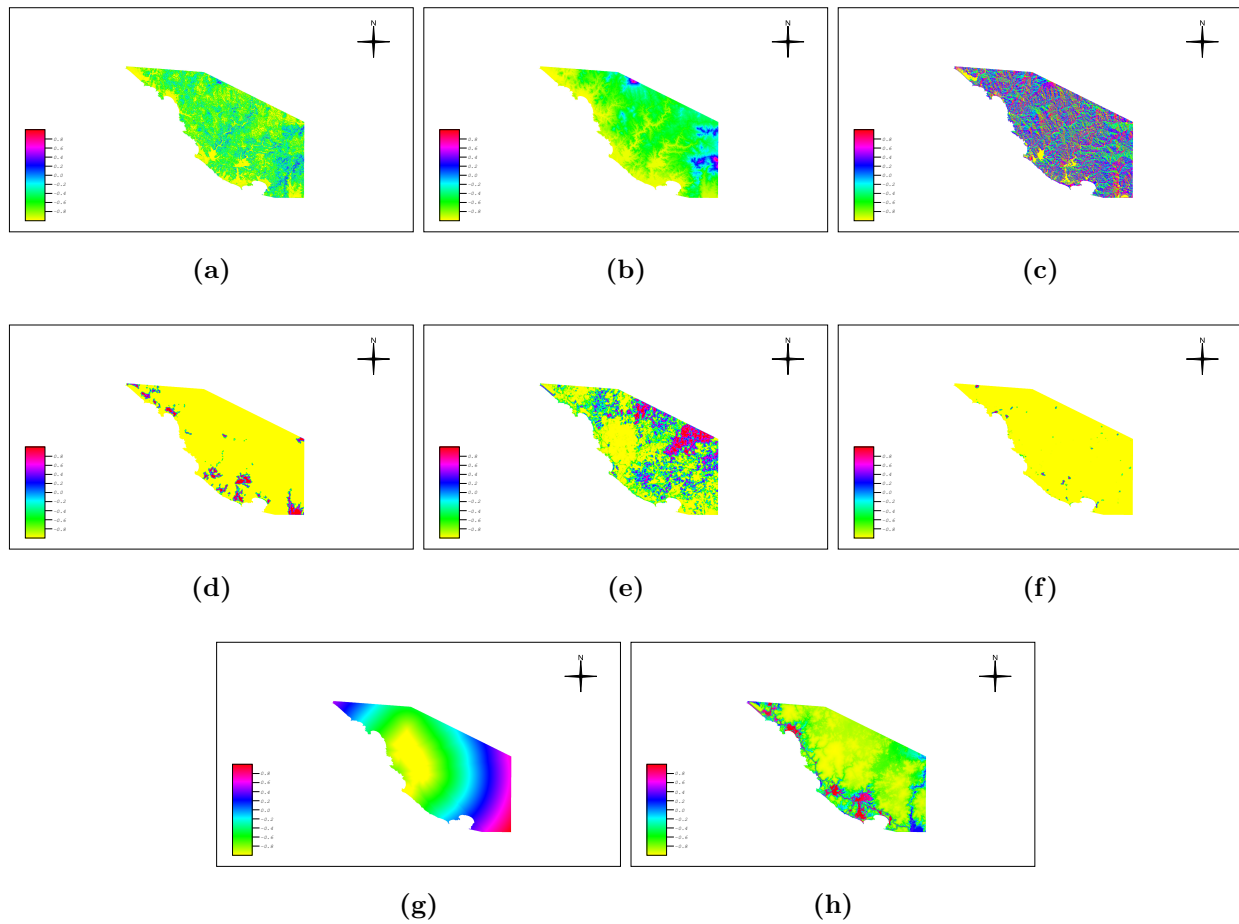


Figura 4.3: Mapas usados como insumo del modelo: (a) pendiente; (b) elevacion; (c) orientación; (d) densidad de celdas de la categoría Dt1; (e) densidad de celdas de la categoría Dt2; (f) densidad de celdas de la categoría Dt3; (g) distancia a la RBCh-C (h) sensibilidad.

tiene asignado un valor que corresponde a la dificultad de atravesarla, de tal forma que el costo de llegar de un punto a otro es la suma de dichos valores, según la trayectoria. Este módulo calcula radialmente el costo por distintas trayectorias y en el mapa ráster resultante cada celda tiene asignado un valor correspondiente al costo de la trayectoria de mínimo esfuerzo, es decir, con mínimo costo acumulado.

Para construir el mapa de costo se usaron las asignaciones se muestran en el cuadro 4.4 (la palabra pendiente quiere decir que dicha cobertura toma el valor de la pendiente en la superficie de costo).

Estas asignaciones tienen el único cometido de representar las distintas situaciones de movilidad en un esquema ordenado: las carreteras de terracería no tienen la infraestructura de las carreteras pavimentadas que les permiten un tránsito libre en pendientes suavizadas, por lo que reciben el costo del valor de la pendiente. En el caso de las brechas, cultivos y potreros, no hay posibilidad de introducir vehículos para su tránsito, de manera que el traslado ocurre a pie, originando una mayor fricción o dificultad de movimiento. Para el caso de los tres tipos de cobertura natural, se pensó en la dificultad de percolar un área natural determinada, tratando de reflejar únicamente una relación de orden de acuerdo a la experiencia en campo. Las selvas medianas (maduras) tienden a presentar sotobosques despejados debido a la baja penetrabilidad de la luz solar, mientras que las selvas bajas se cubren densamente, especialmente durante la temporada lluviosa. El costo máximo de las coberturas vegetadas se asignó a los humedales, que por lo general son zonas de vegetación cerrada y suelos lodosos, y por encima de este costo quedó únicamente el agua.

Existen algunas propiedades deseadas que debemos considerar en la construcción de la relación costo - densidad. En primer lugar, se espera que la influencia de cada localidad sobre los puntos circundantes disminuya con el costo acumulado de llegar a los mismos y tienda a 0 para costos altos, para lo cual se propone en principio la relación más sencilla con esta propiedad:

$$I_i = d/c_i,$$

donde I_i es la influencia ponderada de la localidad más cercana sobre la i -ésima celda, d es la población total de la localidad más cercana a dicha celda y c_i es el costo mínimo de llegar a dicha celda desde la localidad más cercana. La segunda propiedad que debe cumplir nuestra relación es que debe estar acotada superior e inferiormente. Es claro que la relación propuesta tiene una cota inferior en 0 (dado que las densidades y costos siempre son positivos), sin embargo, cuando el punto de una localidad se encuentra en el interior

de la i -ésima celda, o el costo acumulado es 0 (es decir, una región ocupada por carreteras pavimentadas o poblados), esta relación se indetermina, por lo que es necesario realizar la siguiente modificación:

$$I_i = d/(c_i + 1).$$

de esta forma, si una celda contiene una localidad en su interior o está conectada por un camino de costo 0, tal localidad ocupará un valor igual a la población total en dicha localidad.

A pesar de que el enfoque de influencia local es intuitivo, en el sentido de que las poblaciones tienden a moverse en las áreas más cercanas a su comunidad, es posible que el crecimiento de una localidad distante determine la migración de individuos hacia regiones del mapa que no entran en su área de influencia, un fenómeno que pasa desapercibido con la manipulación anterior. Por otro lado, uno de los problemas principales en la determinación de la dinámica de cambio de uso de suelo radica en las conversiones inesperadas de áreas naturales. Este problema puede pensarse como celdas en el mapa que poseen una combinación de características espaciales que las ubican alrededor de un punto crítico, en el cual cualquier cambio mínimo de las variables en el sistema puede desencadenar una transición de estado. Si se piensa al paisaje como unidad, entonces estas transiciones pueden estar determinadas por cambios a distancia de manera que la construcción algebraica adoptada involucra la influencia todas las localidades en cada celda del mapa. La relación que se construyó integra la información de todas las poblaciones y se deriva de la igualdad anterior:

$$I_i = [d_1/(c_{i,1} + 1)] + [d_2/(c_{i,2} + 1)] + \dots + [d_n/(c_{i,n} + 1)] = \sum_{j=1}^n d_j/(c_{i,j} + 1),$$

donde d_j es la población total de la j -ésima localidad, $c_{i,j}$ es el costo mínimo de llegar a la i -ésima celda desde la j -ésima localidad y n es el número total de localidades.

Esta manipulación se puede interpretar como un modelo de “gravitación anómala” y ha sido empleado en simulaciones similares con buenos resultados [57].

4.6. Simulaciones.

Para construir las simulaciones se realizó un proceso de calibración bajo las dos técnicas descritas: redes neuronales artificiales y operadores multigraduados. En ambos casos, el

área de estudio fue separada en regiones diferentes, por un lado para acelerar el tiempo de cómputo y por otro lado para obtener modelos locales que elevaran la precisión al aumentar la especificidad del modelado. En el caso de la calibración con RNA's, el área de estudio fue dividida en dos partes (este y oeste), mientras que para la calibración con operadores multigraduados se construyó una partición de cuatro elementos según una cuadrícula sobre la extensión total de los mapas de cobertura. El criterio de paro empleado en ambos algoritmos consistió en observar el comportamiento de los valores de error y adecuación, según el caso, parando el procesamiento al observar estabilización.

Tanto para la calibración como para las distintas simulaciones presentadas, fue necesario disminuir la resolución espacial del análisis de 10 metros a 30 metros, para hacerla equiparable a la resolución de las variables involucradas. El proceso inverso, es decir, llevar las variables de 30 metros a 10 metros, en general no es recomendable y constituye un problema abierto en el campo de la geoinformática. Con este nivel de resolución, la escala real del análisis es 1:50000, de manera que los resultados siguen ofreciendo una capacidad descriptiva fina a la vez que se evitan errores de interpolación. Por otro lado, esta transformación permite lograr resultados en un tiempo relativamente reducido con respecto a la resolución original. Actualmente no existe información que permita mantener la escala y resolución original, ya que todas las capas, incluyendo los vectoriales de las cartas topográficas, corresponden a la escala mencionada. Con esto en mente, es necesario aclarar que las mediciones en área pueden ser ligeramente diferentes de lo ya expuesto en los párrafos anteriores, empezando por el área total analizada, para la cual hay una diferencia de 9 km^2 , la cual corresponde al 1% de error. Estas diferencias se deben al proceso de cambio de resolución, la cual puede afectar en mayor medida a algunas categorías [60].

Las simulaciones realizadas consisten en distintos escenarios que se relacionan con la construcción de un tramo de carretera que ya se encontraba parcialmente construido durante el trabajo de campo. Se trata de un proyecto que conecta la zona costera del norte del área de estudio con localidades al interior del continente. Este proyecto de infraestructura tiene el potencial de acelerar en gran medida el proceso de degradación ambiental en esta zona específica. La idea principal de estas simulaciones es dar un ejemplo de cómo puede ser usada la herramienta para evaluar el impacto de eventos nuevos en el espacio. De acuerdo al nivel de desarrollo vial se construyeron tres escenarios diferentes:

Escenario "base": este escenario corresponde a la suponer que la carretera en cuestión nunca fue iniciada, por lo que el vectorial correspondiente se omite en cada paso de las proyecciones, con lo que e constituye un panorama conservador en cuanto a devastación

ambiental. El mapa carretero correspondiente se incluye en la figura

Escenario "mitad": para esta construcción se introdujo el tramo carretero que fue observado en campo para la transición 2009-2014, el cual representa un desarrollo parcial sin conexión a la carretera costera. Bajo este escenario, se supone el abandono del proyecto vial a lo largo de las proyecciones restantes. El mapa de caminos correspondiente se presenta en la figura

Escenario "completo": se trata del panorama más realista, en el cual la carretera ya se supone concluida para el año 2014, de manera que en las proyecciones restantes ya hay conexión a la costa, modificando los patrones de degradación según el cambio en la presión demográfica sobre distintos puntos en el paisaje. El mapa de infraestructura vial correspondiente se incluye en la figura

Todos los escenarios anteriores se construyeron según la serie temporal que contiene los años 2004, 2009, 2014, 2019 y 2024, respetando el intervalo de tiempo usado durante la calibración ($2009-2004 = 5$ años).

Además de lo anterior, se construyó un escenario hipotético en el que se retira la RBCh-C en el año 2019 según las proyecciones obtenidas con el escenario "completo". La idea de esta simulación es evaluar a *grosso modo* la influencia que tiene el área natural protegida sobre los alrededores en términos de degradación ambiental. Esto es posible gracias a la forma en la que fue generada la variable que involucra a la reserva para el proceso de entrenamiento. Para lograr el efecto de desaparición se creó un mapa con el valor de 1 en cada pixel, es decir, con el valor máximo de distancia a la reserva y se introdujo este mapa en lugar del mapa original.

Para cada escenario se calcularon las proporciones ocupadas por cada categoría, así como las métricas del paisaje descritas con anterioridad. Además se generaron mapas en los que se plasman las diferencias entre las distintas simulaciones de importancia, así como los cambios acumulados en cada transición según el escenario "completo" con respecto al inicio de la serie (2004). Además de estas comparaciones, se calcularon las áreas ocupadas por vegetación natural para cada escenario para observar las tendencias.

Por último, se emplearon los umbrales calibrados por el algoritmo de operadores multigraduados para hacer un análisis de los factores de mayor relevancia en la transición dominante dentro del área de estudio.

Variable	Fuente	Escala	Rango	Tipo	Descripción
Distancia a carreteras pavimentadas	Vectorial de carta topográfica INEGI versión 4 [35]	1:50,000	[-1,1]	dinámica	La cartografía digital en formato vectorial fue transformada a un formato rasterizado con el cual se calculó la distancia euclidiana a cada vía de comunicación.
Distancia a carreteras de terracería	Vectorial de carta topográfica INEGI versión 4	1:50,000	[-1,1]	estática	
Distancia a brechas	Vectorial de carta topográfica INEGI versión 4	1:50,000	[-1,1]	dinámica	
Distancia a la costa	Vectorial trazado	1:50,000	[-1,1]	estática	Se trazó la línea costera en formato vectorial. Posteriormente se transformó esta geometría a formato ráster y se calculó la distancia euclidiana al objeto.
Distancia a cuerpos de agua perenne	Vectorial de carta topográfica INEGI versión 4	1:50,000	[-1,1]	estática	La cartografía digital en formato vectorial fue transformada a un formato rasterizado con el cual se calculó la distancia a cada cuerpo de
Distancia a infraestructura hídrica	Vectorial de carta topográfica INEGI versión 4	1:50,000	[-1,1]	estática	
Distancia a la cobertura Dt1	Ráster de clasificación temática propia	1:50,000	[-1,1]	dinámica	En las clasificaciones temáticas terminadas se generaron mapas tipo ráster aislando cada tipo de cobertura antropogénica en mapas separados y se calculó la distancia euclidiana a cada parche.
Distancia a la cobertura Dt2	Ráster de clasificación temática propia	1:50,000	[-1,1]	dinámica	
Distancia a la cobertura Dt3	Ráster de clasificación temática propia	1:50,000	[-1,1]	dinámica	
Elevación	Ráster MDE INEGI [7]	1:50,000	[-1,1]	estática	Tomada directamente del MED.
Pendiente	Ráster MDE INEGI	1:50,000	[-1,1]	estática	Calculadas a partir del MED
Orientación	Ráster MDE INEGI	1:50,000	[-1,1]	estática	
Densidad de celdas del tipo Dt1	Ráster de clasificación temática propia	1:50,000	[-1,1]	dinámica	Se generó un mapa que toma valores en la suma de celdas con valor 1 en una vecindad circular de 5x5 sobre mapas ráster binarios de cada cobertura antropogénica (en cada caso, el valor del píxel es 1 donde la categoría responde al tipo de cobertura y 0 en otro caso)
Densidad de celdas del tipo Dt2	Ráster de clasificación temática propia	1:50,000	[-1,1]	dinámica	
Densidad de celdas del tipo Dt3	Ráster de clasificación temática propia	1:50,000	[-1,1]	dinámica	
Sensibilidad	Ráster de clasificación temática propia, ráster de MDE INEGI, conteo poblacional 2005 INEGI [6]	1:50,000	[-1,1]	dinámica	Se generó un mapa que toma valores en la suma de celdas con valor 1 en una vecindad circular de 5x5 sobre mapas ráster binarios de cada cobertura antropogénica (en cada caso, el valor del píxel es 1 donde la categoría responde al tipo de cobertura y 0 en otro caso)
Distancia a la RBCh-C	Cartografía de las Áreas Naturales Protegidas de México de la CONANP [25]	1:50,000?	[-1,1]	estática	Se rasterizó el vectorial de la RBCh-C y se calculó un mapa de distancia euclidiana al objeto.

Cuadro 4.3: Variables empleadas como entradas para los distintos modelos construidos. La cartas topográficas de INEGI comprenden actualizaciones hasta el año 2000.

Cobertura	Costo asignado
Categoría Dt3 o carretera pavimentada	pendiente/100
Carretera de terracería	pendiente/10
Brechas, sin cobertura, categorías Dt1 y Dt2	pendiente
Categoría Vt2	pendiente+1
Categoría Vt1	pendiente+1.5
Categoría Vt3	pendiente+2
Agua	pendiente+3

Cuadro 4.4: Relación de costos asignados para la generación del mapa de costo basado en la pendiente, tipo de cobertura y vías de comunicación.

Resultados.

5.1. Clasificación de coberturas.

En la figuras 5.1 y 5.2 se presentan las coberturas generadas a partir del proceso de clasificación correspondientes al periodo del 2004 y 2009, respectivamente. De acuerdo a la metodología establecida anteriormente se generaron las matrices de confusión que se presentan en los cuadros 5.1 y 5.2.

		Control							
Clasificación	Categorías	Vt1	Vt2	Vt3	Dt1	Dt2	Dt3	Sc	A
	Vt1	5	0	0	0	0	0	0	0
	Vt2	1	28	0	0	0	0	0	0
	Vt3	0	2	82	0	0	0	0	0
	Dt1	0	0	1	20	4	0	0	0
	Dt2	0	0	2	5	28	0	0	0
	Dt3	0	0	0	0	2	10	0	0
	Sc	0	0	0	0	0	0	6	0
	A	0	0	0	0	0	0	0	4
Totales	6	30	85	25	34	10	6	4	

Cuadro 5.1: Matriz de confusión para la clasificación correspondiente al año 2004.

En el cuadro 5.3 se presentan los porcentajes de certidumbre para cada clasificación por categoría, así como el promedio para todas las categorías. Es claro que la clasificación correspondiente al año 2009 acumula un error superior, lo cual se debe principalmente a la calidad de las fotografías obtenidas para estas fechas. No obstante, tanto la incertidumbre por categoría como la incertidumbre promedio se encuentran en valores aceptables.

En el cuadro 5.4 se presentan las extensiones totales en kilómetros cuadrados de cada

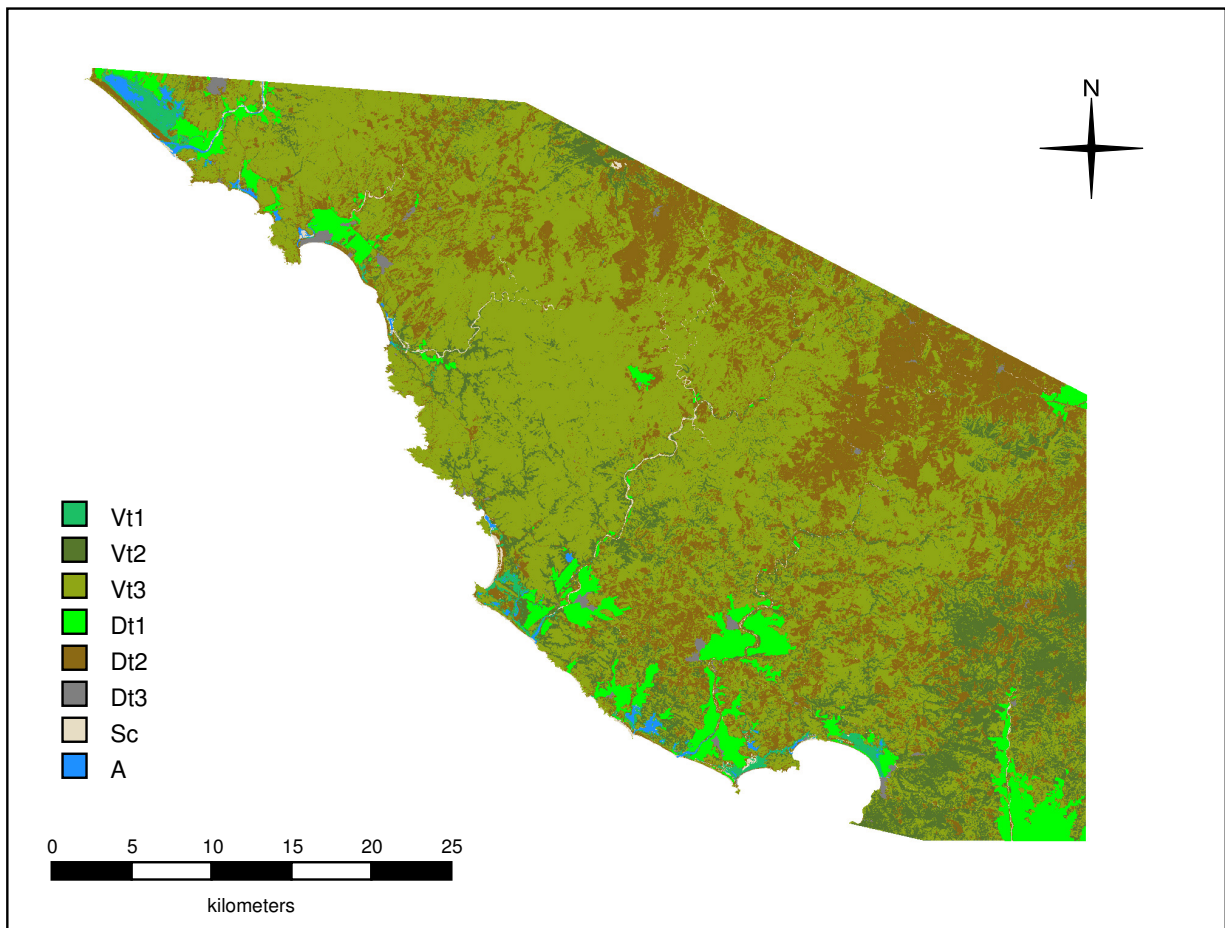


Figura 5.1: Cobertura correspondiente al año 2004.

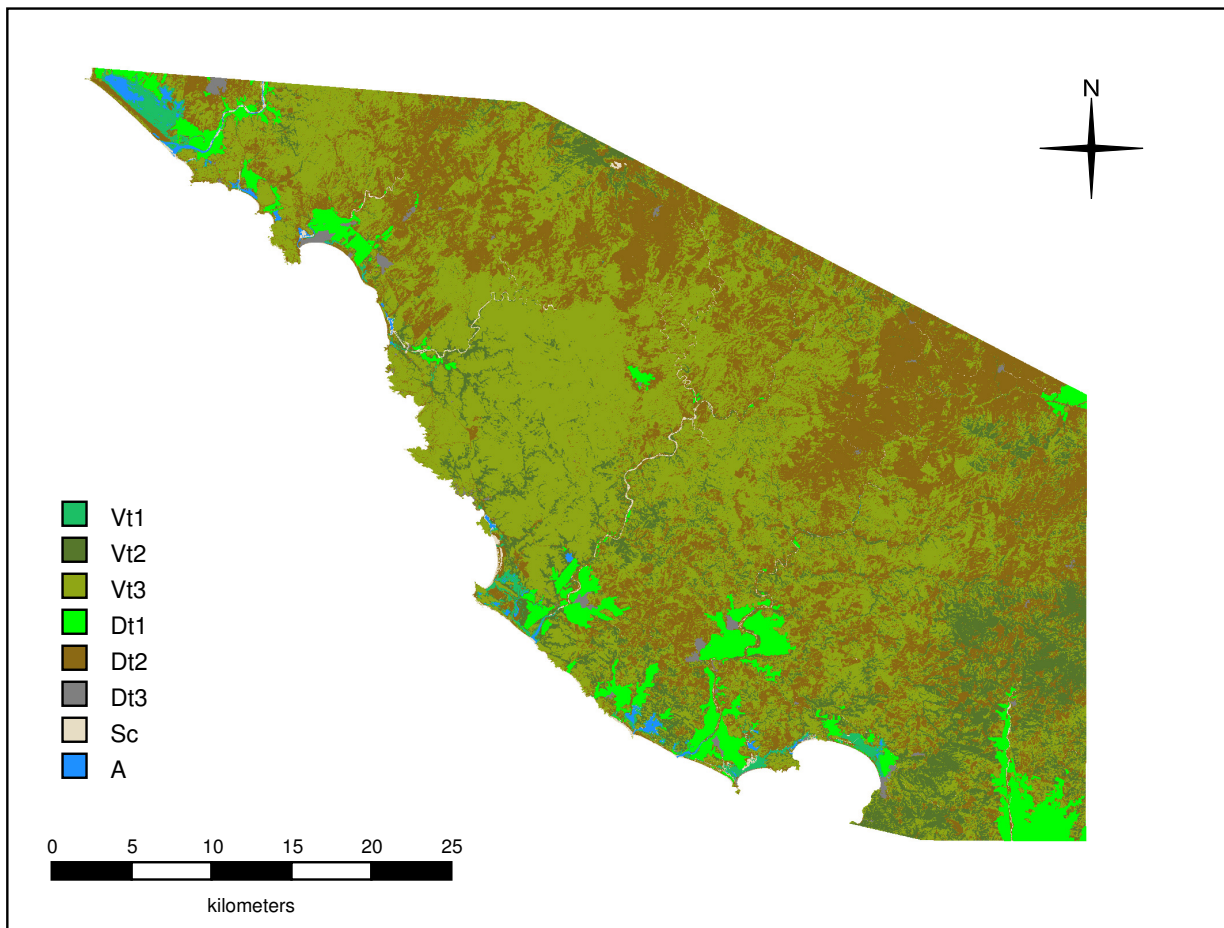


Figura 5.2: Cobertura correspondiente al año 2009

		Control							
Clasificación	Categorías	Vt1	Vt2	Vt3	Dt1	Dt2	Dt3	Sc	A
	Vt1	5	0	0	0	0	0	0	0
	Vt2	1	24	0	0	0	0	0	0
	Vt3	0	6	82	0	0	0	0	0
	Dt1	0	0	1	17	3	0	0	0
	Dt2	0	0	2	8	29	0	0	0
	Dt3	0	0	0	0	2	9	0	0
	Sc	0	0	0	0	0	1	5	0
	A	0	0	0	0	0	0	1	4
	Totales	6	30	85	25	34	10	6	4

Cuadro 5.2: Matriz de confusión para la clasificación correspondiente al año 2009.

categoría para los dos momentos en la serie de tiempo. Las categorías “agua“ y “sin cobertura“ no son de interés dentro de la dinámica ya que se mantuvieron invariantes para ambas coberturas, como se estableció en la metodología, sin embargo, fueron incluidas en la tabla para mostrar los totales obtenidos. De acuerdo a estos resultados, la cobertura natural más vulnerable para el periodo analizado es la categoría de “vegetación tipo 3“, constituida en su mayor parte por selvas bajas caducifolias, con un 14.163% de cobertura transformada, seguido por las categorías de ”vegetación tipo 2”, representada casi por completo por selvas medianas y encinares, con 6.403%, y ”vegetación tipo 1”, correspondiente a los humedales, con 2.058%. Con estas cifras, la tasa de degradación en el periodo de 5 años comprendido entre los años 2004 y 2009 es del 12.497%, es decir, un 2.499% anual, aunque, dado que no se está considerando la dinámica de regeneración ni una categoría de selvas secundarias por separado, esta cifra podría estar sobreestimada. En el cuadro 5.5 se muestra la extensión en kilómetros cuadrados de los distintos tipos de conversión ocurridos en el periodo de estudio. La categoría ”degradación tipo 2”, que corresponde predominantemente a potreros, es el tipo de cobertura con mayor crecimiento, con un aumento de 12960.33 hectáreas que representa un 35.838% de su cobertura inicial, lo cual indica que la actividad transformante más importante en la región sigue siendo la ganadería. Las áreas destinadas a la agricultura, representados por la categoría “degradación tipo 1”, así como las áreas correspondientes a poblados, representados por la categoría “degradación tipo 3”, mostraron un crecimiento mucho menor, especialmente en el caso de las coberturas agrícolas, con 68.8 hectáreas nuevas, correspondientes a un 0.887% de su extensión inicial. Las 14.6 hectáreas nuevas de

Categoría	2004	2009
Vt1	0.8333	0.8333
Vt2	0.9333	0.8000
Vt3	0.9647	0.9647
Dt1	0.8000	0.6800
Dt2	0.8235	0.8529
Dt3	1.0000	0.9000
Sc	1.0000	1.0000
A	1.0000	1.0000
Promedio	0.9194	0.8789

Cuadro 5.3: Certidumbre por categoría para ambos periodos.

desarrollo inmobiliario, representado por la categoría “degradación tipo 3”, representan el menor crecimiento en área de todas las categorías antropogénicas, sin embargo, en términos porcentuales, el aumento del 1.759 % con respecto a su extensión inicial le posiciona como la segunda fuerza de devastación ambiental en crecimiento.

Categoría	Área		Porcentaje	
	2004	2009	2004	2009
Vt1	16.3	15.9	1.08	1.05
Vt2	198.8	186.0	13.17	12.33
Vt3	828.7	711.4	54.91	47.13
Dt1	77.5	77.8	5.14	5.16
Dt2	361.6	491.6	23.96	32.57
Dt3	8.3	8.5	0.55	0.56
Sc	10.4	10.4	0.69	0.69
A	7.6	7.5	0.50	0.50
Total	1509.2	1509.2	100.00	100.00

Cuadro 5.4: Área total de cada tipo de cobertura reportada en kilómetros cuadrados y porcentaje con respecto al área total de cada clasificación en la serie de tiempo.

	Dt1	Dt2	Dt3	Total
Vt1	0.025	0.310	0.000	0.335
Vt2	0.227	12.468	0.033	12.728
Vt3	0.436	116.826	0.113	117.375
Total	0.688	129.603	0.146	130.438

Cuadro 5.5: Conversiones entre las distintas clases de coberturas naturales y coberturas correspondientes a alguna forma de degradación. Los resultados se presentan en kilómetros cuadrados. Correspondencias: Vt1 = vegetación tipo 1; Vt2 = vegetación tipo 2; Vt3 = vegetación tipo 3; Dt1 = degradación tipo 1; Dt2 = degradación tipo 2; y Dt3 = degradación tipo 3.

5.2. Simulaciones.

En el cuadro 5.6 se muestra el error mínimo alcanzado durante el proceso de entrenamiento para las dos secciones en las que fue dividida el área de estudio bajo el algoritmo de RNA's, además de el número de iteraciones al momento del paro. Por otro lado, en el cuadro 5.7 se muestran los valores máximos alcanzados para la métrica utilizada en el algoritmo de operadores multigraduados de acuerdo a la partición generada (4 regiones). A pesar de que estas cifras parecen favorecer a las redes neuronales como algoritmo predictivo, el error se calcula de formas totalmente distintas, de manera que no son comparables. Las diferencias reales se manifiestan al observar los mapas calibrados, los cuales se incluyen en la figura 5.3 y al notar que, por construcción, el segundo algoritmo aproxima no solo la forma, sino también el área ocupada por cada categoría, de manera que a pesar de que pueden existir ciertas diferencias locales, en términos cuantitativos y cualitativos, sigue siendo la mejor opción. Debido a estas diferencias en cuanto a la calidad de los resultados, se decidió utilizar el segundo algoritmo para generar las simulaciones, sin descartar la utilidad del primero, un aspecto que será abordado en la discusión.

Fragmento	Número de iteraciones	Error
1	9756	0.021770
2	12461	0.020979

Cuadro 5.6: Relación de número de iteraciones y error mínimo alcanzado para cada fragmento analizado durante el proceso de entrenamiento de la red neuronal artificial.

Los tres escenarios generados presentaron comportamientos muy similares en cuanto a las métricas del paisaje utilizadas. No obstante, es notorio que existen diferencias a nivel local

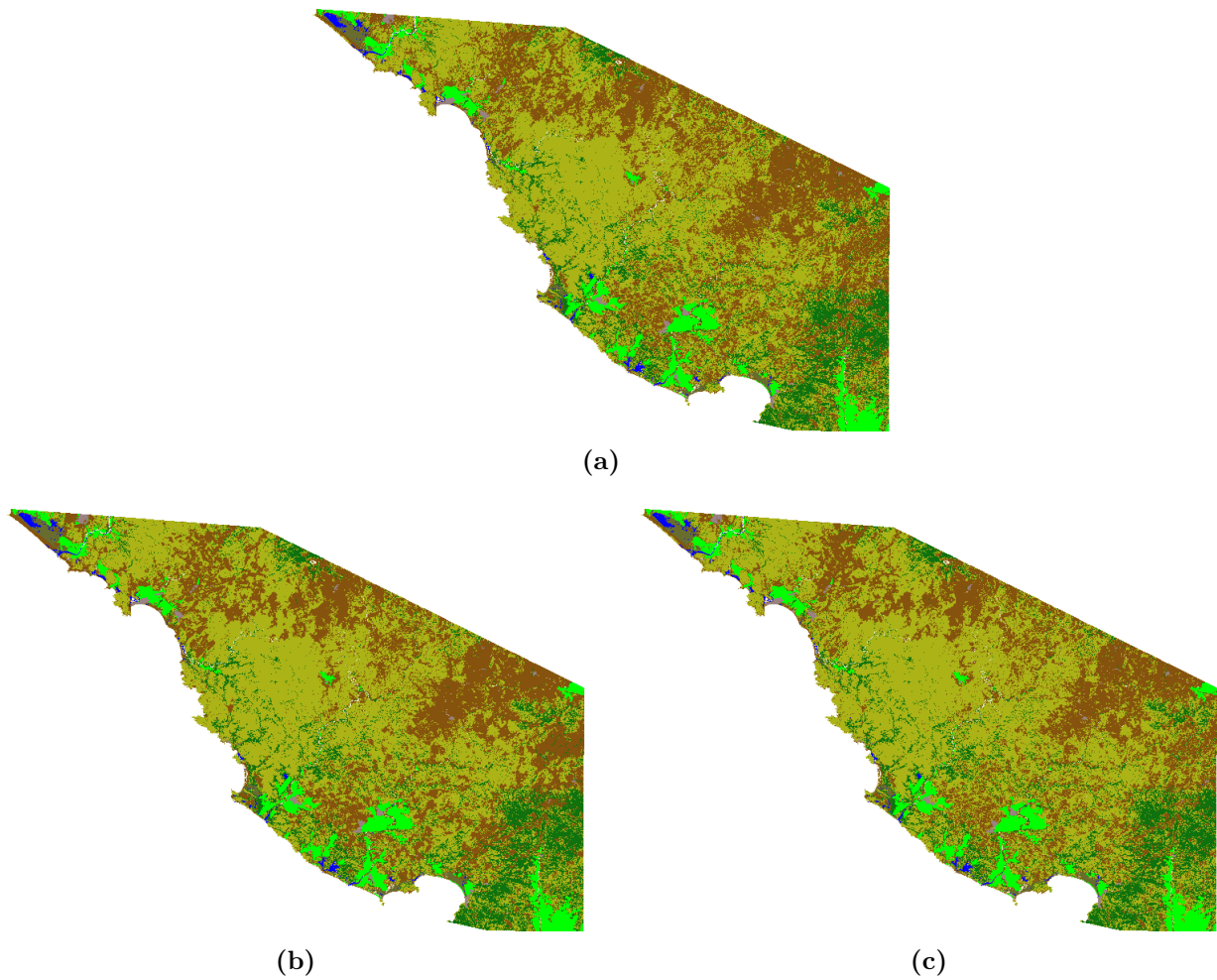


Figura 5.3: Comparación de calibraciones con respecto a la cobertura 2009 proveniente de la clasificación. (a) Cobertura 2009; (b) Calibración con operadores multigraduados; (c) Calibración con redes neuronales.

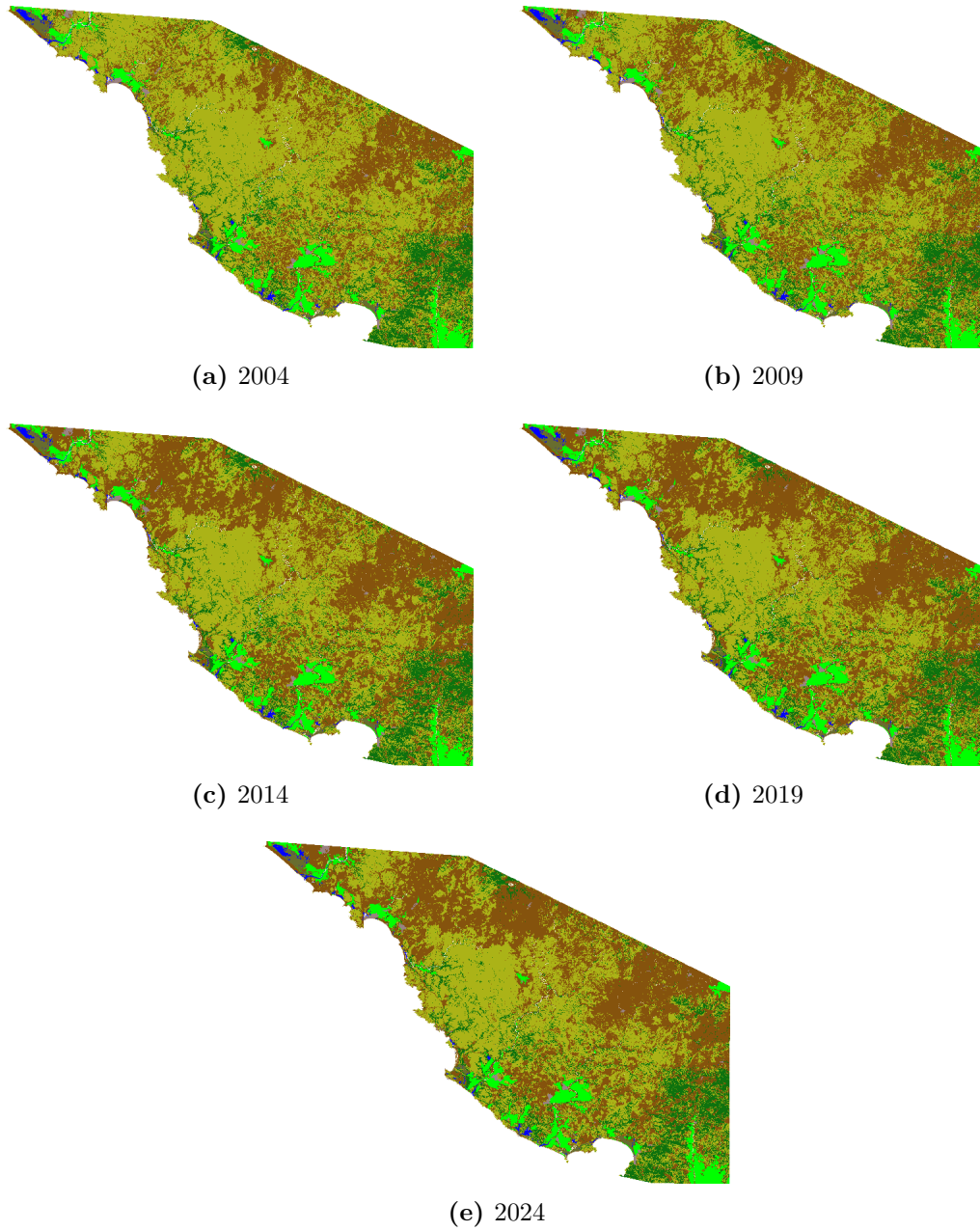


Figura 5.4: Serie de tiempo construida con las predicciones arrojadas por el escenario “base”.

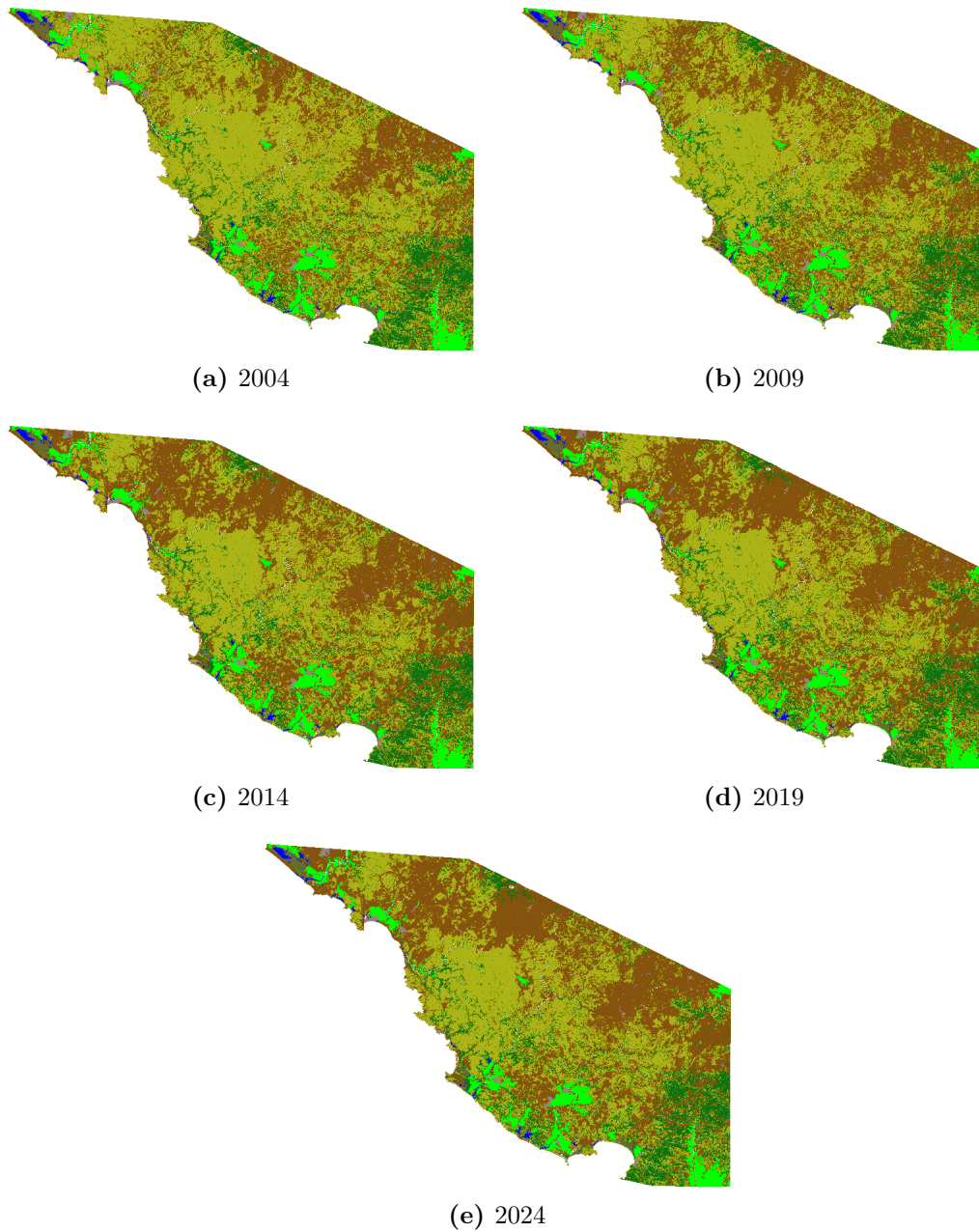


Figura 5.5: Serie de tiempo construida con las predicciones arrojadas por el escenario "mitad".

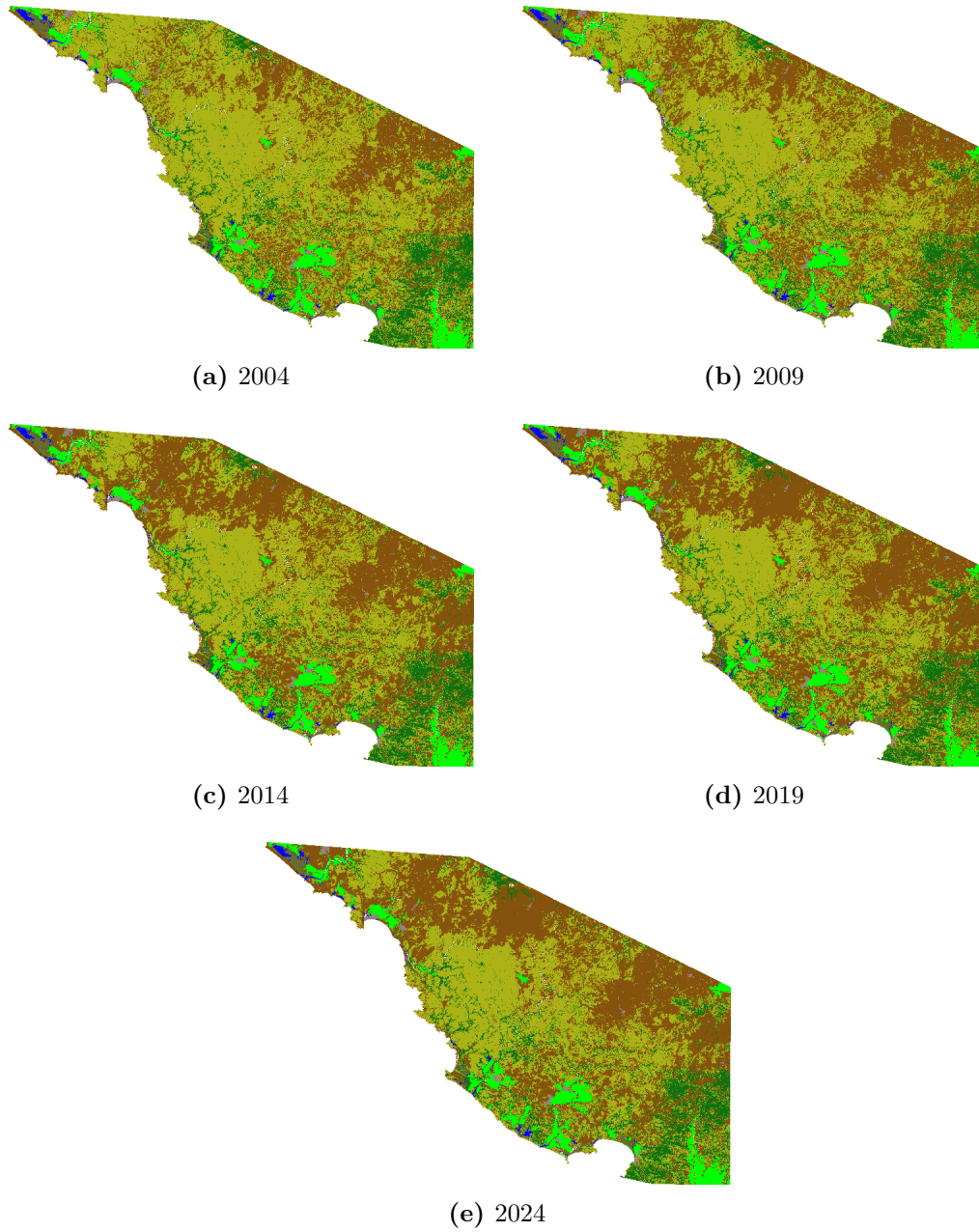


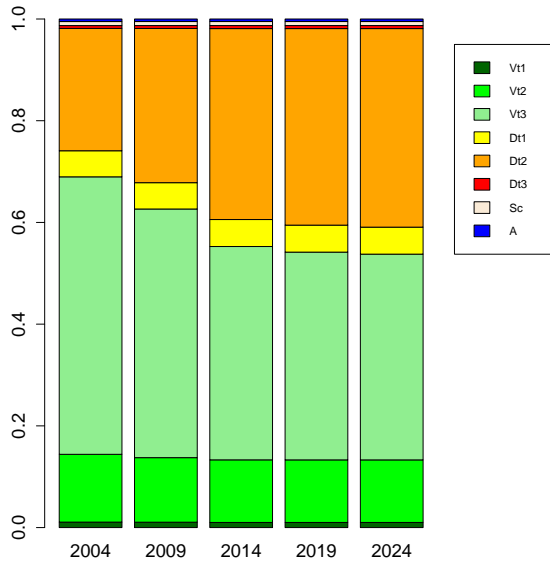
Figura 5.6: Serie de tiempo construida con las predicciones arrojadas por el escenario “completo”.

Fragmento	Número de iteraciones	Adecuación
1	2885	0.954750
2	2400	0.970699
3	2827	0.944232
4	3636	0.975092

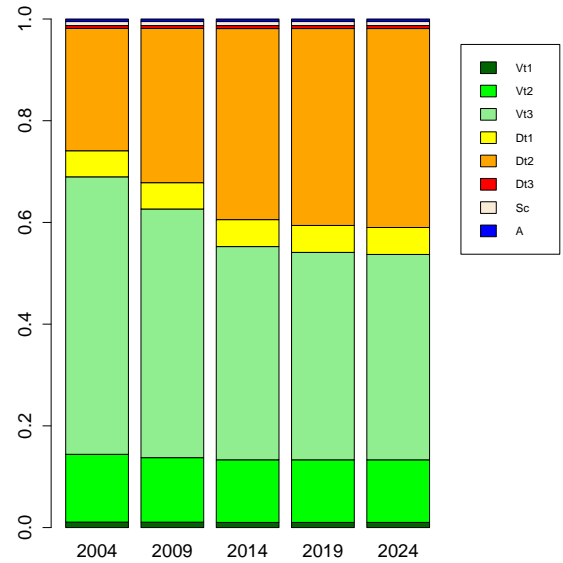
Cuadro 5.7: Relación de número de iteraciones y adecuación máxima alcanzada para cada fragmento analizado durante el proceso de calibración por algoritmos genéticos bajo el método de operadores multigraduados.

en el paisaje al observar la distribución espacial y temporal de la degradación ambiental, un aspecto que dichas métricas no logran capturar al referirse a características del total de la cobertura. En la figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran, respectivamente, los resultados para el escenario “base“, en el cual se excluye por completo el desarrollo vial mencionado en la metodología, el escenario “mitad“, en el cual se supone el abandono del proyecto carretero a la mitad de su construcción a partir del año 2009, y el escenario “completo“, en el cual se incluye el vectorial completo de la carretera en el año 2014. En la figura 5.7 se muestran tres gráficas de barras aglutinadas que corresponden a las proporciones ocupadas por cada categoría según cada escenario a lo largo de la serie de tiempo construida. Es muy notoria la similitud cuantitativa entre los tres escenarios, con diferencias apenas perceptibles que señalan el efecto de la carretera introducida. De acuerdo a estos resultados, la categoría Dt2, que engloba las actividades de ganadería, es la categoría antropogénica de mayor influencia en el futuro bajo las condiciones determinadas por los datos de entrada. Es importante notar que tanto el comportamiento de cambio en proporciones representado en la gráficas mencionadas, como el comportamiento de las curvas determinadas por la cobertura vegetal total en cada momento de la serie, incluidas en la figura 5.8, apuntan hacia una estabilización del proceso de transformación.

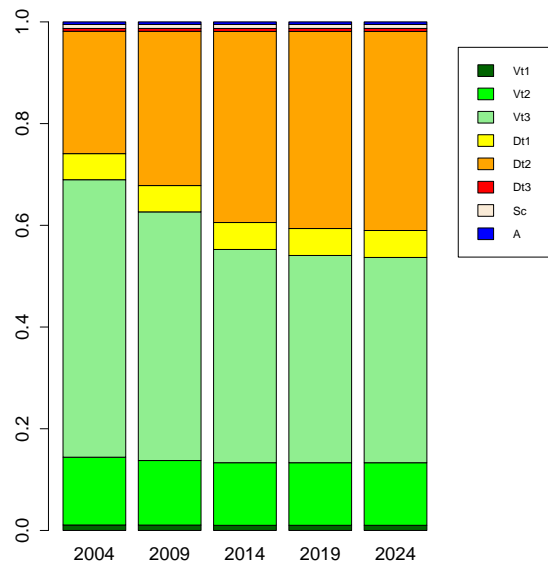
A pesar de las similitudes observadas, en términos numéricos es posible notar que la introducción de la carretera sí tiene un efecto global sobre el comportamiento de las predicciones, como se puede notar en el cuadro 5.8. Los tres escenarios se ordenan de mayor a menor nivel de degradación en cada momento de la serie de tiempo construida. En el caso del año 2014, los escenarios mitad y completo tienen los mismos valores ya que, como se explicó en la metodología, el segundo tramo de la carretera se introdujo en el escenario “completo” para generar la simulación 2019, de manera que la cobertura 2014 coincide en ambas series. Por otro lado, usando la cifra para el escenario más realista, según estas simulaciones, de los



(a)



(b)



(c)

Figura 5.7: Proporciones ocupadas por cada categoría en el tiempo según los tres escenarios construidos: (a) Escenario “base”; (b) Escenario “mitad”; (c) Escenario “completo”.

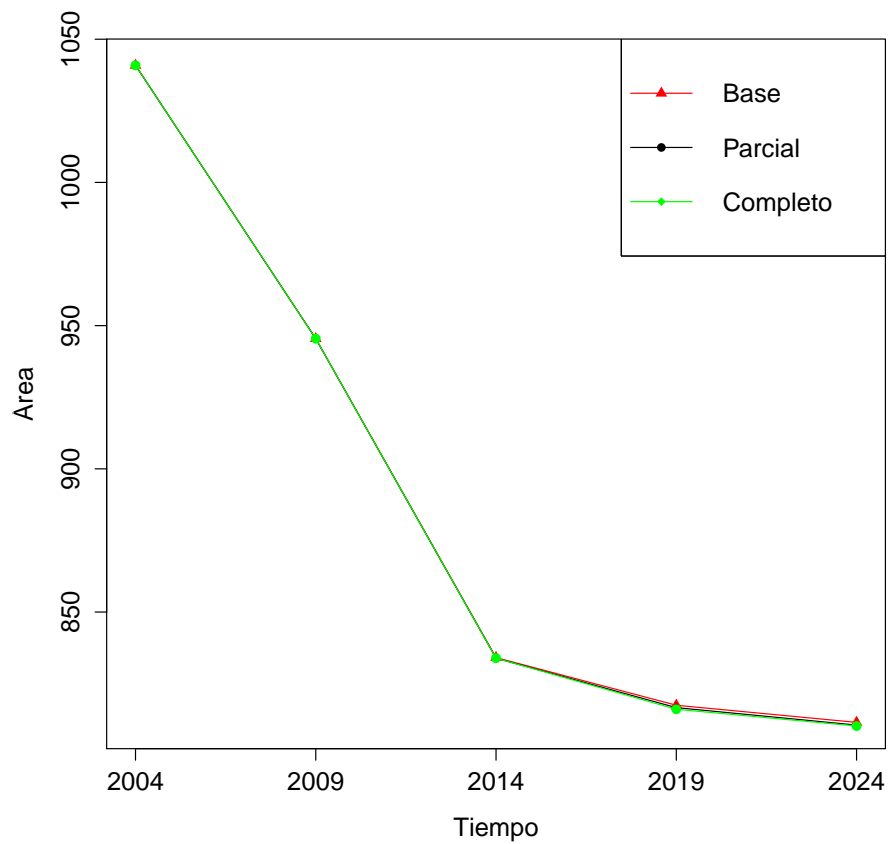


Figura 5.8: Cambio en área para la cobertura vegetada ($Vt1, Vt2$ y $Vt3$) según los tres escenarios construidos.

1043.77 km^2 (cantidad tomada del cuadro 5.4) de áreas sin perturbación aparente en el 2004, se espera una disminución de 233.57 km^2 hasta el año 2024. Esta disminución no necesariamente representa clareamiento total de coberturas ya que la categoría Dt2 engloba distintos niveles de clareamiento y regeneración.

Escenario	2014	2019	2024
Base	834.09	817.46	811.47
Mitad	833.89	816.63	810.54
Completo	833.89	816.05	810.20

Cuadro 5.8: Relación de áreas vegetadas sin perturbación aparente dada kilómetros cuadrados según las simulaciones generadas para cada escenario.

En las figuras 5.9 y 5.10 se incluyen las gráficas correspondientes al número total de parches y al índice RL, las dos métricas referentes a la propiedad de conexidad incluidas en este trabajo. Las tendencias que se muestran en estas gráficas difieren muy poco entre cada escenario, siendo los últimos tres momentos de la serie los que acumulan las mayores discrepancias. Estos resultados, como ya se mencionó en la metodología, no pueden ser interpretados de forma aislada y es necesario tomar en cuenta las tendencias en cuanto a pérdida de área y cambio en proporciones. Dado que la tendencia general apunta hacia una disminución progresiva de las áreas no afectadas con un concomitante aumento de la proporción ocupada por actividades antropogénicas, la disminución en el número de parches debe ser interpretada como un proceso de erradicación de parches de coberturas naturales de menor tamaño (generalmente aislados entre matrices de coberturas antropogénicas).

Por otro lado, los valores observados para el índice RS arrojan un comportamiento complejo en el que se observa inicialmente una caída abrupta seguida de un ligero incremento. Estas tendencias, aparentemente contradictorias, inducen una narrativa del proceso: en los primeros momentos de la serie, los parches más grandes son mermados progresivamente, provocando el decremento observado, acumulándose la devastación principalmente en la fronteras, sin generar nuevos parches (dado que el número de parches desciende, como ya se señaló); ya que la proporción de coberturas naturales disminuye con el tiempo, el incremento en el índice responde a una estabilidad en el tamaño de los parches más grandes con la desaparición de los fragmentos más pequeños. Estos cambios cualitativos en conexidad se pueden resumir en tres procesos diferentes: fragmentación, destrucción de parches pequeños y degradación periférica de parches de mayor tamaño.

En cuanto a las diferencias con respecto al punto de partida, es notoria la acumulación

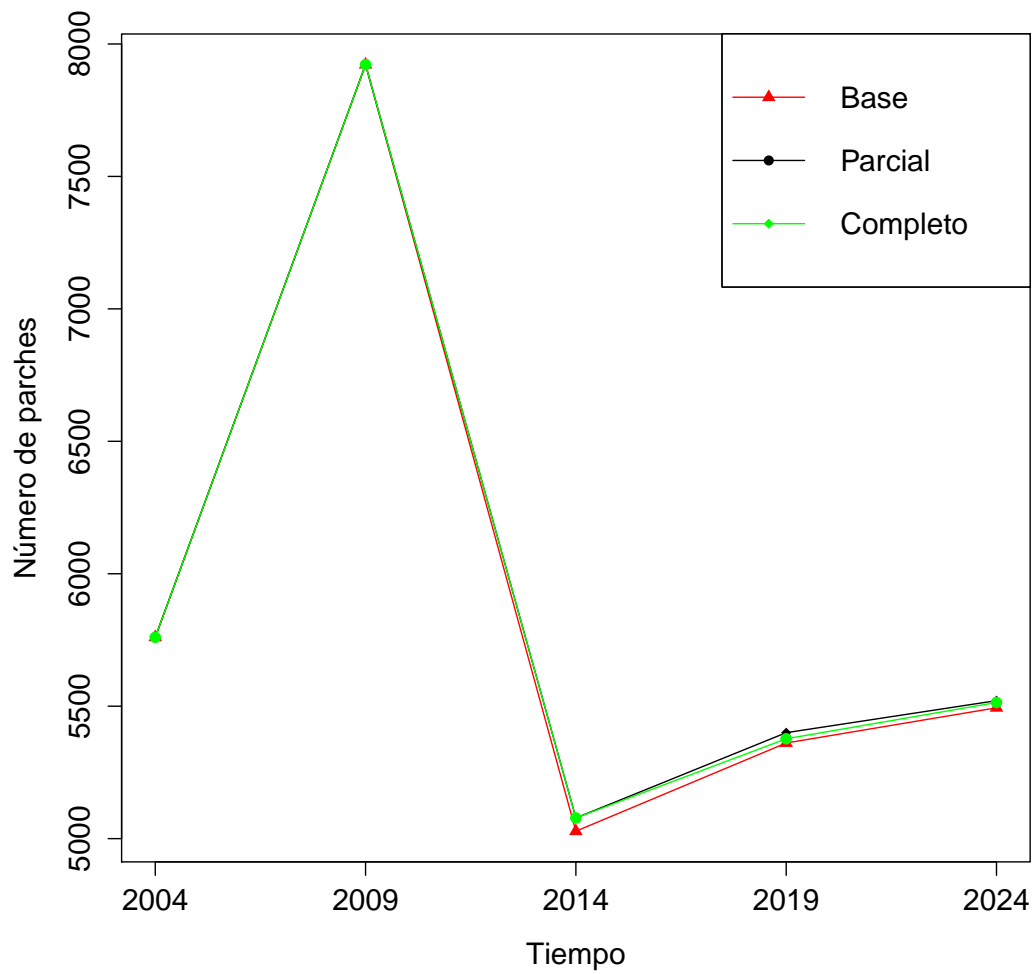


Figura 5.9: Cambio en el número de parches para las cobertura vegetada (Vt1,Vt2 y Vt3) según los tres escenarios construidos.

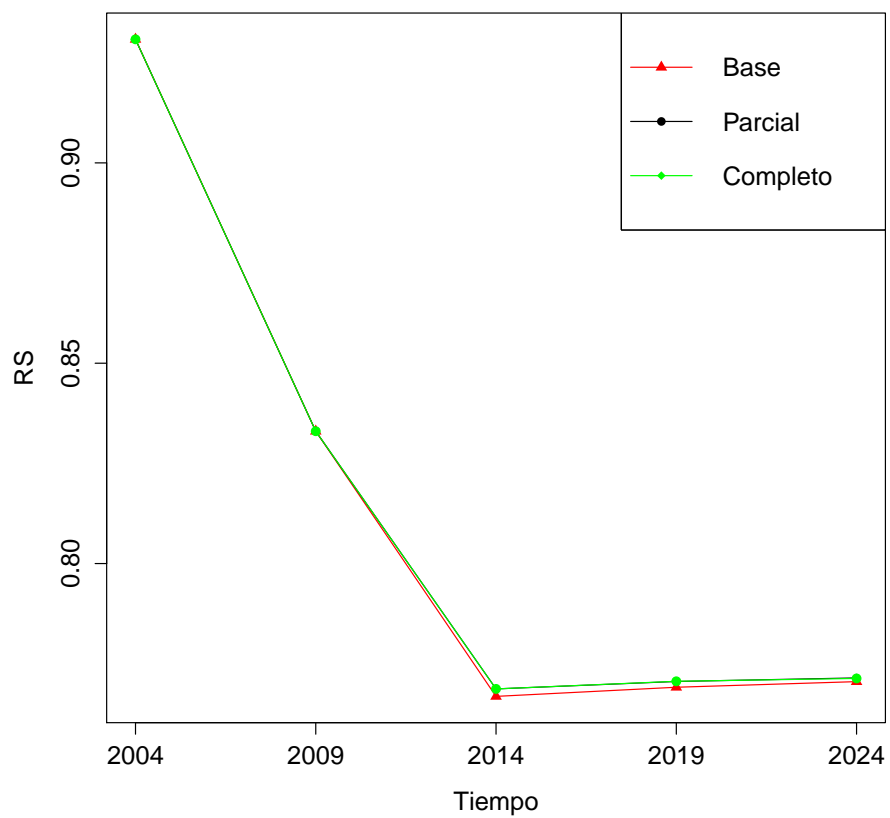


Figura 5.10: Cambio en conectividad según el índice RS para la cobertura vegetada (Vt1, Vt2 y Vt3) según los tres escenarios construidos.

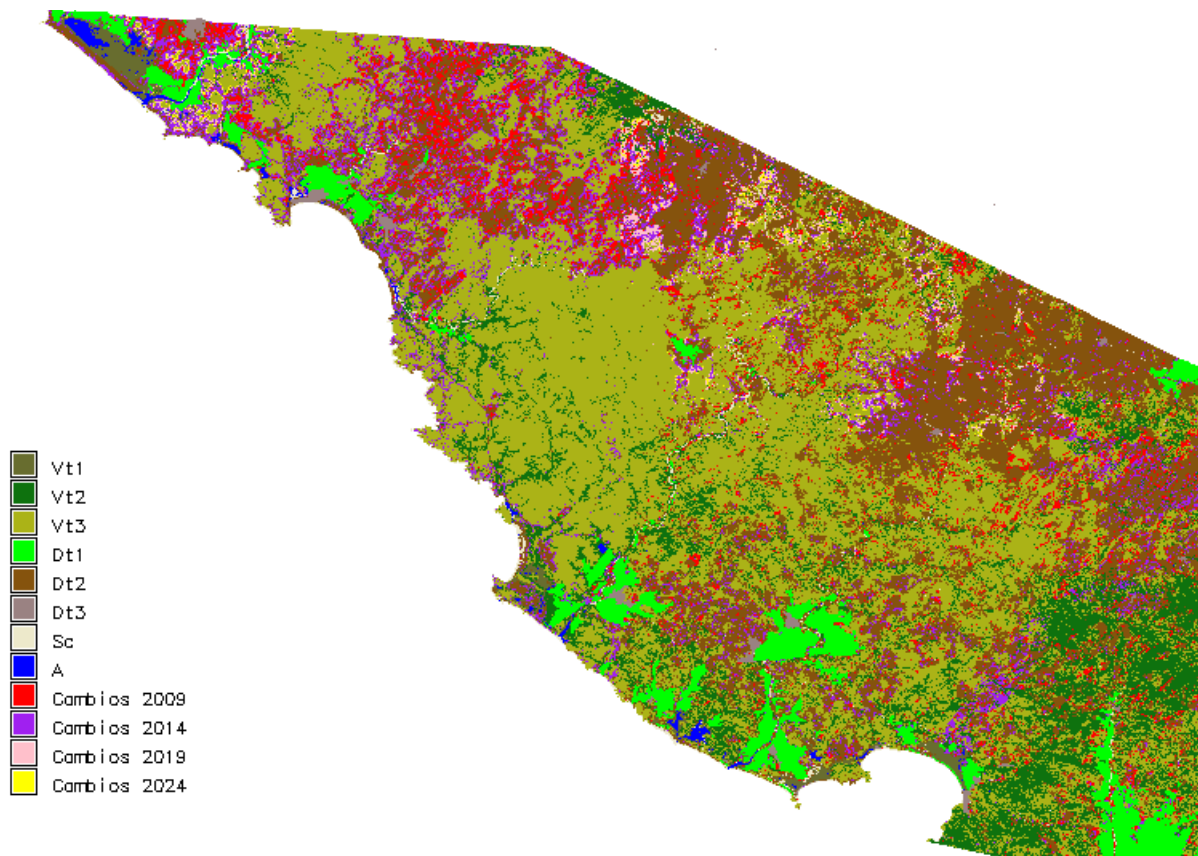


Figura 5.11: Cambios ocurridos en los distintos periodos según el escenario “completo”.

de deterioro que se observa en la región noroeste del área de estudio (especialmente en la zona que colinda con la frontera norte de la RBCH-C), como puede observarse en la figura 5.11 donde se resaltan las zonas convertidas desde el año 2004 hasta la proyección generada para el año 2024 en distintos colores, según el escenario más realista que corresponde a la obra vial terminada. Esta acumulación de cambio parece responder a la presencia del tramo de carretera mencionado (localizado justo en la zona mencionada), el cual ejerce una fuerza atractiva hacia la zona, ensanchando las áreas ocupadas previamente por la categoría "Dt2" acompañada por la desaparición de parches de coberturas naturales de menor tamaño, además de generar nuevos parches de coberturas antropogénicas que actúan como centros expansivos de degradación. La tendencia en esta zona es inicialmente de fragmentación, con la reducción progresiva del número de parches naturales, hasta alcanzar un estado en el que predomina localmente la categoría antropogénica mencionada como matriz, en la cual se encuentran embebidas algunas zonas de coberturas naturales relativamente inaccesibles. Es importante señalar que este resultado cualitativo también indica un orden de degradación en el espacio, con lo que es posible localizar las áreas que serán degradadas en un intervalo de tiempo menor. Por otro lado, la estabilización de la degradación señalada por las métricas calculadas es clara de forma cualitativa al notar que para el año 2024, los cambios son mínimos con respecto a los periodos anteriores.

Por otro lado, en la figura 5.12 se muestran las diferencias entre los escenarios extremos ("completo" y "base"), indicando en rojo las áreas presentes en el escenario "completo" y ausentes en el escenario "base", y en amarillo las áreas con una relación recíproca. Este resultado indica que no solo se eleva la degradación ambiental con la introducción de la carretera, sino que ocurre una redistribución de la misma que responde a un alza en la presión hacia otras zonas que se hacen más accesibles gracias a dicha infraestructura. Además de otras causas que serán discutidas más adelante, estas diferencias son congruentes con la estaticidad de las poblaciones, es decir, si suponemos que las poblaciones se mantienen relativamente constantes, es coherente pensar que la degradación, más que aumentar en todas partes, se redistribuye, ya que es hipotéticamente la misma cantidad de gente ejerciendo presión sobre el paisaje. Una analogía simplista podría ser la introducción de nuevas ramificaciones en una tubería a flujo constante.

Al contrario de lo que podría pensarse, los cambios más drásticos al anular la RBCh-C no se observan al interior del territorio comprendido por la misma, sino en las periferias, como puede observarse en la figura 5.13. La diferencia en áreas convertidas con respecto al escenario anterior es de 106.744 km^2 , lo que constituye una cantidad considerable de zonas naturales

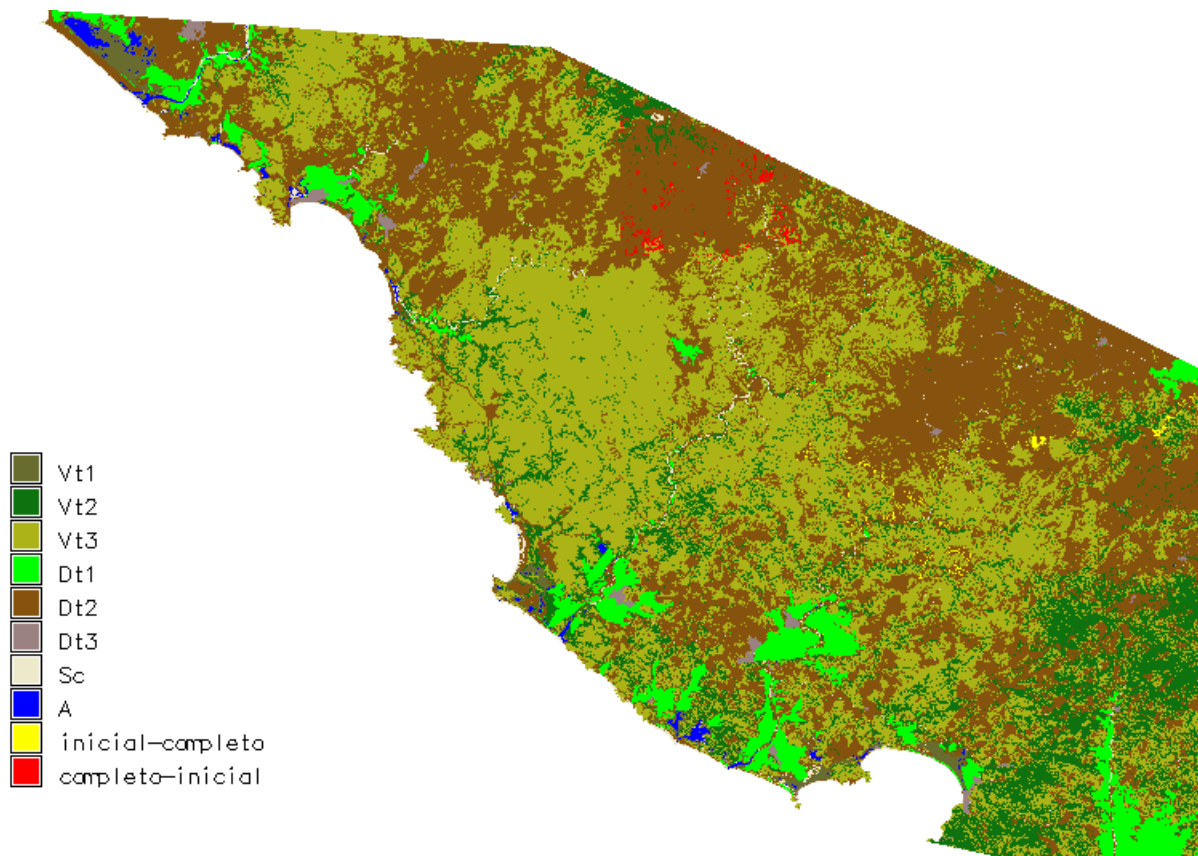


Figura 5.12: Diferencia entre los escenarios "base" y "completo".

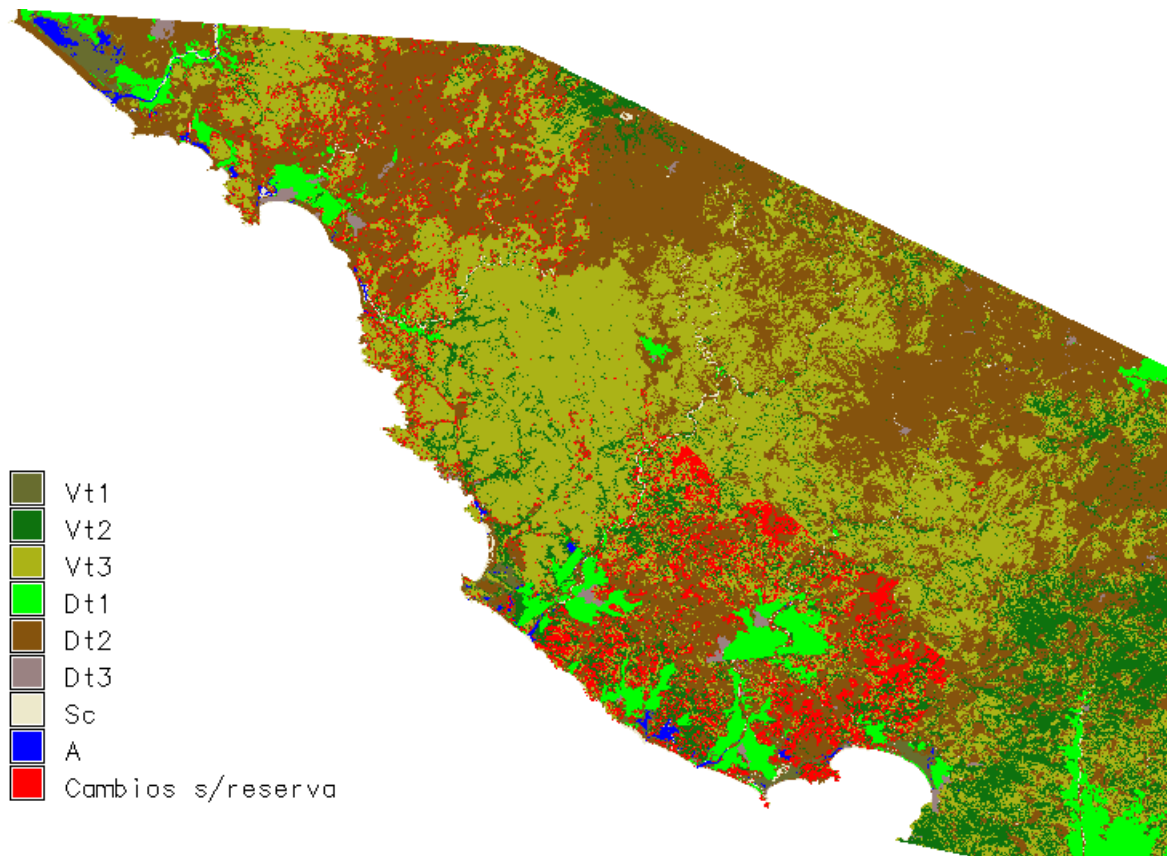


Figura 5.13: Efecto espacial de la desaparición de la RBCh-C en el periodo 2019-2024 con respecto al escenario "completo".

perturbadas, localizadas principalmente al sureste de la zona de estudio. Esto sugiere que la presencia de la RBCh-C ofrece un efecto amortiguador de la devastación ambiental más allá de la influencia directa dada por la prohibición y que existen ciertas zonas en las cuales la variable principal que determina el cambio podría ser la presencia de esta área natural protegida.

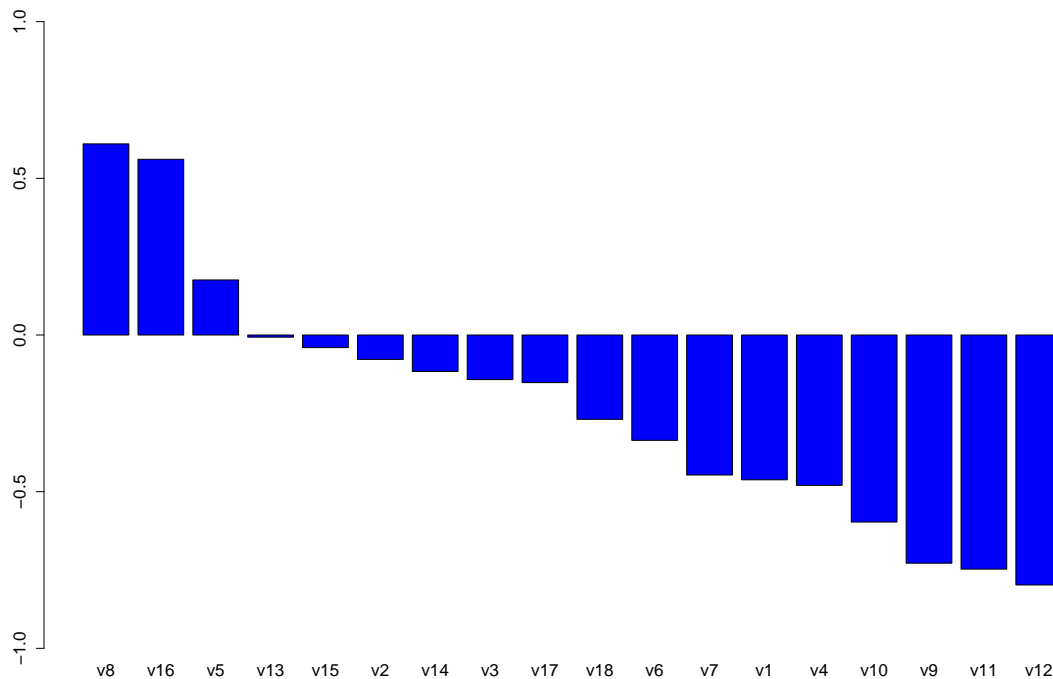


Figura 5.14: Umbrales asociados a cada variable para la transición Vt3 - Dt2.

Por último, a partir de los pesos obtenidos con la calibración se puede hacer un análisis relativamente sencillo de la importancia que tiene cada variable en las distintas transiciones. En este caso, como se observa en todas las simulaciones, así como en las coberturas obtenidas, la transición más importante, en franca dominancia, es Vt3-Dt2, es decir, el cambio de coberturas dominadas por selvas bajas hacia coberturas dominadas por potreros o algún tipo de perturbación asociada (incluidas distintas categorías de sucesión), cuya relación de pesos calibrados para cada variable se incluye en la figura 5.14¹. En esta gráfica, cada barra representa el valor del peso asociado después de la calibración y los valores cercanos a 1 representan variables que restringen la transición en cuestión. De forma recíproca, los valores

¹Los valores que se presentan en esta gráfica corresponden a los promedios para cada umbral sobre los cuatro cuadrantes en los que fue dividida el área de estudio durante el proceso de calibración.

cercanos a -1 indican que la variable asociada no constituye una restricción para este tipo de cambio de cobertura. Para que una restricción se cumpla, el valor ocupado por la variable debe ser mayor al umbral correspondiente. Por otro lado, el valor de x asociado al operador multigrado según su construcción es de 0.3209, lo que significa que de las 18 restricciones (fórmulas de umbral) impuestas, deben cumplirse al menos $(1 - 0,3209) * 18 \approx 12$.

Según estos resultados, las variables más importantes, de acuerdo a la interpretación anterior, son v8,v16,v5,v13,v15 y v2, que corresponden respectivamente a la distancia a parches de la cobertura Dt2 (potreros), densidad de pixeles de la cobertura Dt1 (cultivos), distancia a cuerpos de agua perenne, pendiente, densidad de poblados y distancia a carreteras de terracería, en este orden. Se mencionan estas 6 variables pues para que la transición falle, es necesario que al menos 6 de los criterios no se cumplan y la probabilidad de que esto suceda es directamente proporcional a la magnitud del umbral, según la construcción del método.

Discusión y Conclusiones.

El trabajo aquí presentado es el resultado de un proceso evolutivo del pensamiento bajo presiones temporales, restricciones informacionales y aprendizaje constante que derivó en una herramienta computacional que no ha dejado de cambiar, incluso al momento de esta discusión. Muchos fueron los posibles caminos que aparecieron y la ilusión de recorrerlos todos fue asimilándose como irrealizable en las condiciones de una tesis de maestría. No obstante, la herramienta construida, producto principal de esta tesis, ha plantado los cimientos para el desarrollo de nuevas utilidades al servicio de la biología, todo en un contexto de gratuidad y transparencia algorítmica, premisas del movimiento *open source*. Por otro lado, el hecho de haber contado únicamente con dos momentos en la serie de tiempo para calibrar, datos incompletos y plagados de errores, pone a prueba la eficacia de la herramienta para lidiar con este tipo de problemas.

El proceso de clasificación temática de coberturas involucra numerosos aspectos en cada paso que pueden ser discutidos y que plantean formas de tratar la información por completo distintas. En primer lugar, la elección de las categorías aquí planteadas no fue un proceso arbitrario de aglutinación de elementos, sino que responde a la necesidad de reducir el esquema de clasificación a un producto trabajable de acuerdo a los fines establecidos. Inicialmente se planteó trabajar con clasificaciones más finas que distinguieran los diferentes tipos de vegetación, así como su estado de conservación agregando categorías de vegetación secundaria para cada tipo. Bajo este esquema sería posible hacer descripciones finas del proceso de cambio, así como simulaciones complejas basadas en las dinámicas de transición con reversiones entre dichas categorías. La inviabilidad de esta aproximación se reveló prontamente frente a la falta de información suficiente como para capturar toda la dinámica necesaria para hacer predicciones.

El empleo de categorías de vegetación secundaria implica, en primer lugar, un conocimiento profundo de los procesos de regeneración en la escala paisajística, es decir, de la

manera en la que las variables espaciales influyen sobre el recambio de la vegetación a partir del abandono de un manejo productivo. Por otro lado, al involucrar la influencia humana en el espacio se agregan elementos de incertidumbre que ofuscan aun más el entendimiento de dicho proceso. Para ejemplificar esta situación, una cobertura antropogénica abandonada podría comenzar una compleja trayectoria de regeneración que involucra la constitución de diferentes comunidades vegetales que van cambiando hacia algo que podría o no ser la cobertura natural precedente al manejo, pero en cualquiera de estas etapas existe siempre la posibilidad de un nuevo evento de desmonte que reinicie dicho proceso, si es que se puede hablar de un reinicio, ya que el punto de partida no sería el mismo que en la situación anterior.

Estos eventos re-conversión, más que ser una posibilidad remota, son la esperanza del manejo en la zona, de manera que aglutinar las selvas secundarias como parte de una categoría de manejo antropogénico es sensato si se piensa en dicha categoría como una clase de estados con transiciones entre los mismos, más que como un estado en si mismo. Esta es la perspectiva que se abordó para todas las categorías antropogénicas y su elaboración en subcategorías es un trabajo que supone información en series de tiempo más completa, recordando que únicamente se contó con dos momentos diferentes.

Además de los problemas relacionados con el cambio regenerativo y el cambio antropogénico, la dificultad de establecer firmas espectrales sobre información ruidosa es un problema técnico que obligó al establecimiento de categorías que engloban más de un tipo de vegetación. Los puntos de control obtenidos en campo para realizar la validación no son suficientes para establecer subcategorizaciones sin incrementar el error del producto final, además de que, dadas las características del proceso de cambio, es posible que el refinamiento de la clasificación no sea relevante, por ejemplo, el hecho de que cierto parche contenga matorrales altos en vez de selvas bajas influye poco en su transformación a potreros. Sin embargo, este no puede ser un supuesto *a priori*, de manera que un protocolo de clasificación con puntos de control establecidos es un elemento deseable para un programa de monitoreo ambiental en la zona. Por esta razón parece necesaria la creación de un esquema metodológico que permita mantener estudios a largo plazo en este aspecto. Dicho esquema, además de involucrar puntos de control con variables de interés medidas según una periodicidad establecida (quizás tomando como base algunos aspectos de la metodología actual del Inventario Nacional Forestal), debería de incluir un protocolo de clasificación común, tanto en el acuerdo de las categorías mínimas de separación como en los algoritmos empleados, con miras a estudios comparativos.

En cuanto a las simulaciones, el primer planteamiento incluía la construcción de escenarios

complejos que involucraban suponer el establecimiento de centros turísticos con un desarrollo similar al proceso que sufrió la zona de Puerto Vallarta, además de un escenario de concientización en el que se adoptaran prácticas productivas sustentables. De nueva cuenta, esta idea sobrepasa por mucho las posibilidades del presente proyecto, principalmente por falta de información, tiempo y formación. Para el escenario de desarrollista sería necesario un estudio minucioso de la historia de crecimiento del caso de referencia que permitiera identificar los factores ambientales, sociales y económicos que determinaron el cambio hacia esa perspectiva de manejo. Esta labor por sí misma justificaría tal vez más de un trabajo de investigación por separado, con la inclusión de personal de otras disciplinas, ya que la formación biológica o matemática queda excedida por la complejidad del fenómeno, e incluso si no se requiriera de otras formaciones, es un trabajo para más de una persona.

Por otro lado, el escenario “favorable”, representado por prácticas no destructivas implicaría suponer más de una propiedad no presente en el sistema en la actualidad. Por mencionar algunas de estas propiedades: la manera en la que las poblaciones influyen sobre el paisaje debería de responder a intereses comunes de manejo, determinando la distribución de bienes bajo un esquema igualitario libre de competencia, o al menos, bajo un esquema de competencia justa; el esquema de conservación debería de dejar de ser prohibitivo para convertirse en voluntario, un aspecto en el que se involucra el arraigo cultural hacia los recursos naturales, cualidad ausente en el presente y cuyo establecimiento depende de fenómenos sociales difíciles de entender; las políticas gubernamentales deberían de conducirse, no por intereses económicos aliados a las grandes corporaciones de agronegocios, sino hacia el rescate de la producción común, basada en tecnologías sustentables, libres de insumos agroquímicos forzados y que promovieran la conservación del germoplasma nativo (esta es tal vez la propiedad más difícil de imaginar). Por más difícil que sea entender cómo llegar a que un geosistema como el que se abordó adopte estas de propiedades, es aun más difícil construir un caso de simulación que no se antoje esotérico o por lo menos inverosímil. Por estas razones, y en gran medida por falta de tiempo, se decidió limitar la simulación a probar el efecto del desarrollo vial descrito.

Los resultados arrojados por los distintos escenarios de desarrollo vial planteados sugieren que la construcción de la carretera que conecta la parte continental norte con la zona costera podría tener dos efectos principales sobre el paisaje en el futuro: por un lado, aumenta la tasa de degradación, aunque en menor medida bajo el supuesto de estabilidad demográfica; y por otro, tiene un efecto redistributivo de la degradación ambiental hacia las zonas cercanas a la carretera. La estaticidad de las variables, dada por la ausencia de información actualizada,

es un factor que puede influir de manera importante sobre los resultados de la simulación. En el caso de las variables demográficas, la realización de proyecciones a nivel localidad agregaría una fuente de error importante ya que en la región es común que aparezcan y desaparezcan localidades de un contéo o censo a otro.

Por otro lado debe recalcar que las proyecciones de la CONAPO predicen un crecimiento cercano al 0% para la población total del municipio de La Huerta en los próximos años (hasta el 2030) e incluso una disminución poblacional [2], lo cual fortalece el enfoque de tomar las poblaciones iniciales como único factor demográfico en el modelo. Sin embargo, esta información no debe ser interpretada con ingenuidad ya que la dinámica de crecimiento demográfico depende de factores de desarrollo que retroalimentan el proceso de devastación. Tal es el caso de un panorama de desarrollo turístico, el cual elevaría el influjo poblacional por la presencia de nichos laborales en la costa, un fenómeno que escapa a las proyecciones poblacionales comunes.

En estas simulaciones únicamente se intentó plasmar el efecto de la construcción de una carretera, proyecto que a futuro podría tener efectos importantes en términos de conservación, no obstante, las vías de comunicación de menor rango, como las carreteras de terracería y las brechas usadas para el transporte de ganado entre las diferentes parches de potreros, son elementos importantes en la dinámica de expansión y (si se asume regeneración) de contracción de las coberturas con manejo antropogénico. En el caso de las brechas, los vectoriales fueron actualizados de acuerdo a la inspección visual de las fotografías pancromáticas y multiespectrales disponibles para el año 2009, de manera que cualquiera de los tres escenarios supone la presencia de estos elementos. Un análisis más detallado del efecto de la aparición de nuevos caminos involucraría la elaboración de múltiples combinaciones de escenarios que, a pesar de que es susceptible de ser realizada dadas las características del módulo, exceden en gran medida el tiempo disponible para concluir este trabajo.

El hecho de que las diferencias entre los distintos escenarios de desarrollo vial sean mínimas es congruente con los umbrales asociados al tipo de degradación dominante, ya que la distancia a carreteras pavimentadas no figura entre las variables de mayor importancia para este tipo de cambio. Dado que la calibración se realizó usando la capa original de caminos, la cual incluye únicamente la carretera costera y la carretera que conecta con la cabecera municipal, asociadas predominantemente a las coberturas antropogénicas Dt1 (poblados) y Dt3 (cultivos), es posible que no haya sido capturada correctamente la influencia de las carreteras pavimentadas sobre el crecimiento de la categoría Dt2, produciendo diferencias muy sutiles al introducir el proyecto vial, aunque estas “sutilezas” son relativas a la escala

de análisis, así como a la posición dentro del mapa. Por otro lado, es notorio que la zona más afectada hacia el año 2009 coincide con el área en la cual se construyó el primer tramo de carretera, lo cual sugiere que el proceso inicial de planeación y construcción ocurrido en el periodo 2004-2009 pudo haber tenido un efecto que no fue capturado por el proceso de calibración.

Ya que la infraestructura vial es una de las variables más importantes para la modelación del cambio de uso de suelo, es importante mencionar que existen aproximaciones que ofrecen alternativas para mitigar los problemas mencionados. Una de estas opciones, la cual excede los alcances del presente trabajo, es modelar la aparición de brechas y caminos por separado para alimentar el modelo de cambio de uso de suelo [57] usando reglas conocidas que involucran rutas de costo mínimo, además de otras variables relacionadas, como la densidad de los caminos preexistentes. No obstante, si el modelado de crecimiento de caminos es deficiente, es posible empeorar los resultados finales del modelo, además de que se agregan supuestos que oscurecen su significado.

Las características del algoritmo de operadores múltiples permiten medir, a grandes rasgos, la influencia de las variables involucradas ya que determinan umbrales de cambio que pueden ser interpretados de forma relativamente transparente. Esta característica, independientemente de su función para crear simulaciones, le confiere al método una utilidad analítica que puede aportar información relevante al momento de interpretar resultados o plantear nuevas preguntas respecto al problema de expansión de coberturas antrópicas, lo que constituye una franca ventaja sobre el método de redes neuronales artificiales implementado, el cual puede ser destinado a otro tipo de aplicaciones, como las que se tratan más adelante. Es interesante notar que, de acuerdo a este análisis, la presencia de otras coberturas antropogénicas influye positivamente sobre el crecimiento de la cobertura Dt2, de manera que, a pesar de que el crecimiento en dichas coberturas puede no ser significativo, su influencia sobre las tendencias de devastación no debe ser subestimada, así como tampoco deben ser subestimadas las interacciones colectivas de variables de aparente insignificancia..

En cuanto al efecto de retirar la RBCh-C del mapa, los resultados obtenidos muestran que, de acuerdo a la calibración obtenida, la presencia de este elemento parece tener una influencia restrictiva sobre el proceso de degradación en las áreas circundantes. Esto es especialmente conspicuo en la región sureste del área de estudio, en los lomeríos situados a corta distancia de la costa. Sin embargo, hay que recalcar que este es un hecho relativo al modelo, el cual puede albergar artefactos, y una interpretación simplista es riesgosa. Un ejemplo de posible artefacto podría ser que esta última zona, independientemente de la presencia de la reserva,

no presentara cambios importantes en la realidad y que durante el proceso de calibración este comportamiento se enmascarara en la variable de distancia con respecto al área protegida, sin que exista una relación concreta. A pesar de lo anterior, el trabajo de Sánchez - Azofeifa y colaboradores [53] parece apoyar, al menos en parte, los resultados de esta simulación.

El algoritmo de redes neuronales se caracteriza por ser robusto frente a la incertidumbre y se trata de un método con efectividad probada para muchos problemas, sin embargo, al emplear criterios puntuales para el entrenamiento de la red, las calibraciones tendieron a subestimar el crecimiento de las coberturas antrópicas y a acumular gran cantidad de errores locales. Con esta limitante, los valores que se predicen para cada celda se parecen más a la modelación del nicho humano que al fenómeno real de la degradación ambiental, puesto que no se toma en cuenta que, además de ocupar sitios propicios para el desarrollo, las actividades transformantes siguen patrones que no están determinados directamente por los valores de variables en cada celda sino por prácticas culturales y tecnológicas que determinan parches con morfologías específicas.

En algunos casos, la dinámica de cambio de uso de suelo se ha reducido a algo similar al problema de nicho ecológico, sin embargo, los resultados empleando métricas puntuales apuntan a que no es sensato realizar este tipo de prácticas sin tomar en cuenta la morfología de los procesos, ya que, a pesar de que es cierto que en general no hay desarrollo donde no se puede desarrollar, los caprichosos patrones morfológicos que describen las áreas deforestadas no son producto directo de estas propiedades, algo que ya se ha discutido parcialmente en la literatura al hablar de la relación de variables biofísicas con el establecimiento de distintos tipos de manejo [61].

Tomando en cuenta lo anterior, el ruido asociado al desfase de las variables en el espacio puede afectar de forma significativa las simulaciones con algoritmos puntuales, produciendo resultados pobres. Frente a estas dificultades, el algoritmo propio mostró un mejor desempeño gracias a su construcción, pues no solo se buscó producir resultados morfológicamente similares sino que capturaran las tendencias de cambio en área, todo esto bajo distintas escalas, relajando el supuesto de la coincidencia puntual de los eventos de transformación.

La construcción de nuevas herramientas computacionales para su aplicación en problemas concretos dentro de la biología ambiental es un área poco explorada por los que ejercen esta disciplina, en gran medida por una barrera semántica y sintáctica entre los diferentes elementos que son necesarios para esta tarea. En el transcurso del desarrollo de este trabajo, fue haciéndose cada vez más claro que existen numerosos problemas ecológicos que se pueden

abordar desde el punto de vista del geocómputo, aportando la cualidad de espacialidad explícita. Dicha cualidad es el punto de adhesión de una gran cantidad de variables que relacionan los eventos ecológicos con sus entornos geofísicos y sociales, los cuales se pueden abstraer como variables geográficas en un contexto computacional.

Como biólogo, considero que el geocómputo con fines de modelación ecológica no es una rama del conocimiento que se encuentre bien desarrollada en nuestro país. La participación de los biólogos en este campo no es fomentada durante el periodo de formación y pasa desapercibida, de manera que su inclusión en los planes de estudio a nivel licenciatura y posgrado es necesaria para la generación de interés entre los futuros profesionales de la biología. Hoy en día, el amplio desarrollo de las comunidades de software libre ofrece la posibilidad de construir un sinnúmero de herramientas para fines diversos, desde el entretenimiento hasta el computo científico. Todas las piezas necesarias para desarrollar programación útil dentro del campo de la biología están disponibles gratuitamente y con la información necesaria para el aprendizaje autodidacta en la red, de manera que las limitaciones materiales para el desarrollo en este campo son mínimas.

El módulo programado ofrece al trabajador de la biología ambiental una opción para realizar pronósticos de influencia de proyectos de desarrollo tales como la construcción de carreteras, inmuebles o la expansión de cualquier tipo de cobertura antropogénica. No obstante, los resultados deben ser interpretados con cautela debido a que la precisión de las predicciones no depende únicamente del algoritmo empleado. La elección de las variables adecuadas para su ejecución determina en gran medida la calidad de los resultados, esto es especialmente importante si se piensa usar como una herramienta para la realización de manifiestos de impacto ambiental, ya que es posible generar resultados engañosos que pudieran comprometer la veracidad de los argumentos empleados en estas prácticas. En realidad, la inspiración principal de esta herramienta no es apoyar la validación de la devastación ambiental, como frecuentemente ocurre con las manifestaciones de impacto ambiental, sino ayudar a hacerle frente.

La estructura del módulo admite una gran variedad de aplicaciones no restringidas al objetivo principal del mismo. Como un ejemplo básico, usando máscaras ráster producidas a partir de áreas de interés es posible generar clasificaciones de vegetación a partir de imágenes satelitales multiespectrales usando el algoritmo de redes neuronales ya implementado, de acuerdo a una metodología que es muy común en la literatura [14][19][55]. Cabe mencionar que en este trabajo no se usó el módulo con tales fines, por un lado para evitar circularidades metodológicas y tener elementos externos al propio desarrollo, y por otro, por falta de tiempo

para hacer pruebas que avalaran su eficacia para este tipo de aplicación ¹.

Otras aplicaciones incluyen la generación de mapas de nicho potencial a partir de puntos de colecta que determinan “perfiles” en capas bioclimáticas, es decir, vectores de condiciones ambientales en cada punto, problema que se encuentra relacionado con otra posible aplicación: el avance de especies invasoras y plagas potenciales de cultivos. Para estas últimas aplicaciones no se explotarían las métricas sensibles a la forma y existen ya herramientas de fuente abierta disponibles como *Open Modeller* [8], la cual incluye el algoritmo de Máxima Entropía, el cual ofrece muchas ventajas con respecto a las redes neuronales además del algoritmo GARP, que ha sido ampliamente estudiado, sin embargo, el presente módulo tiene la ventaja de estar embebido en un SIG sobre el cual se pueden trabajar y generar capas nativamente para ser aplicadas sin necesidad de ser exportadas.

Existe además la posibilidad de introducir el algoritmo de Máxima Entropía en un futuro como parte de las opciones de modelación, aunque es necesario evaluar la utilidad de este desarrollo, en parte porque ya existe la herramienta de fuente abierta mencionada y en parte porque es posible que sea preferible implementar otras opciones basadas en análisis de regresiones que han probado tener resultados muy similares con exigencias computacionales menores [31].

En cuanto a otros sistemas para modelar cambio de uso de suelo, como los que se mencionaron en los antecedentes, es claro que cuentan con un gran número de funcionalidades de las que carece el módulo programado y de ninguna manera es la intención abarcarlas, ya que el producto programado se encaja en un SIG que tiene todas las demás piezas para ensamblar un modelador con cualquiera de las características de estos sistemas usando scripts en *shell* o *python*. Más aun, desde la rama de desarrollo de la versión 6.4 de GRASS se incluye un prototipo de ensamblador gráfico para hacer rutinas con cualquiera de los módulos (ahora incluyendo el presente). Por otro lado, usando protocolos de servicios de procesamiento web (WPS, por sus siglas en inglés) como *pyWPS*[10], es posible incluir el módulo como un servicio de modelación usando cualquier tipo de servidor de mapas que se ajuste al protocolo (como Geoserver[4], 52-North[1] o Degree[3]) y visualizadores geográficos web como Openlayers[9].

Las bibliotecas utilizadas para el desarrollo (FANN y GALib) resultaron tener algunas desventajas en cuanto a su implementación con las métricas sensibles a la forma. La razón estriba en que la definición de criterios morfológicos para el cálculo del error o de la

¹A estas alturas, me queda muy claro que la aplicación del módulo para realizar clasificaciones de vegetación es equivalente a cualquier método de clasificación con redes neuronales artificiales y en realidad no es indispensable hacer pruebas para tal uso.

adecuación, según el caso, no es una tarea sencilla y termina siendo equivalente a programar desde el inicio muchas de las funciones utilizadas, además de que, en el caso de GALib, es necesario agregar código en C++, el cual no es el lenguaje nativo de GRASS y siempre es preferible evitar lo más que se pueda el uso de lenguajes externos.

El uso de bibliotecas externas además agrega dependencias para la instalación del módulo que dificultarían su empleo para muchos usuarios, por lo que uno de los objetivos a futuro es programar los métodos necesarios desde el inicio. Parte de este trabajo ya fue realizado en lo que respecta a los algoritmos genéticos, ya que el algoritmo de operadores multigraduados requiere de establecer métodos de mutación, selección y recombinación que ya fueron implementados, por lo que el desarrollo posterior se reduciría a adaptar estas funciones de forma dinámica para que puedan ser usadas con otros fines.

Esta tesis fue escrita enteramente en el procesador de texto de alto nivel de fuente abierta L^AT_EX

Bibliografía

- [1] 52-north. <http://52north.org/>.
- [2] Conapo. proyecciones poblacionales por localidad. http://conapo.mx/es/CONAPO/Por_localidad.
- [3] Degree. <http://www.deegree.org/>.
- [4] Geoserver. <http://geoserver.org/display/GEOS/Welcome>.
- [5] Inegi - censo general de población y vivienda 2010. http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/entidad_indicador.aspx?ev=5.
- [6] Inegi - conteo de población y vivienda 2005. http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/entidad_indicador.aspx?ev=4.
- [7] Inegi - continuo de elevaciones mexicano. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>.
- [8] Open modeler. <http://openmodeller.sourceforge.net/>.
- [9] Openlayers. <http://openlayers.org/>.
- [10] Python web processing service. <http://pywps.wald.intevation.org/>.
- [11] H. Abdi, D. Valentin, and B. Edelman. *Neural Networks*. Sage University Paper, USA, 1999.
- [12] H. Balzter. Markov chain models for vegetation dynamics. *Ecol Model*, 126:139–154, 2000.
- [13] A. Ben-David. Comparison of classification accuracy using cohen's weighted kappa. *Expert Systems with Applications*, 34(2):825–832, 2008.

-
- [14] J. Benediktsson, P. H. Swain, and O. K. Ersoy. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 28(4):540–552, 1990.
- [15] I. Benenson and P. M. Torrens. *Geosimulation. Automata - based modeling of urban phenomena*. John Wiley and Sons, primera edición, 2009.
- [16] E. Bribiesca. Measuring 2-d shape compactness using the contac perimeter. *Computers. Math. Applic.*, 33(11):1–9, 1997.
- [17] E. Bribiesca. An easy measure of compactness for 3-d and 2-d shapes. *Pattern Recognition*, 41:543–554, 2008.
- [18] A. Burgos and J. M. Maass. Vegetation change associated with land-use in tropical dry forest areas of western mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104:475–481, 2004.
- [19] G. A. Carpenter, M. N. Gjaja, S. Gopal, and C. E. Woodcock. Art neural networks for remote sensing: vegetation classification from landsat tm and terrain data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35(2):308–325, 1997.
- [20] A. Castillo, A. Magaña, A. Pujadas, L. Martínez, and C. Godínez. Understanding the interaction of rural people with ecosystems: A case study in a tropical dry forest of mexico. *Ecosystems*, 8:630–643, 2005.
- [21] A. Challenger, R. Dirzo, et al. Factores de cambio y estado de la biodiversidad. In *Capital natural de México*, volume II: Estado de conservación y tendencias de cambio, páginas 37–73. Conabio, 2009.
- [22] F. S. Chapin and S. F. Weiss. *Factors influencing land development: evaluation of inputs for a forecast model*. Institute for Research in Social Science, University of North Carolina, 1962.
- [23] H. M. Cleaver. The contradictions of the green revolution. *The American Economic Review*, 62(1/2), 1972.
- [24] D. A. Coley. *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers*. World Scientific, 1999.

- [38] E. Lopez, G. Bocco, M. Mendoza, and E. Duhau. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. a case in morelia city, mexico. *Landscape and Urban Planning*, 55:271–285, 2001.
- [39] B. B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, 1983.
- [40] S. M. Manson. Agent-based modeling and genetic programming for modeling land change in the southern yucatán peninsular region of méxico. *Agric Ecosyst Environ*, 111:47–62, 2005.
- [41] S. M. Manson. Land use in southern yucatán peninsular region of mexico: Scenarios of population and institutional change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30:230–253, 2006.
- [42] J. F. Mas, H. Puig, J. L. Palacio, and A. Sosa-López. Modeling deforestation using gis and artificial neural networks. *Environ. Model Softw*, 19:461–471, 2004.
- [43] E. Mendoza and R. Dirzo. Deforestation in lacandonia (southeast mexico): Evidence for the declaration of the northernmost tropical hotspot. *Biodiversity and Conservation*, 8:1621–1641, 1999.
- [44] V. Mesev. Remote sensing of urban systems: hierarchical integration with gis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 21(3):175–187, 1997.
- [45] P. G. Murphy and A. E. Lugo. Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17:67–88, 1986.
- [46] M. Neteler and H. Mitasova. *Open Source GIS A GRASS GIS Approach*. Springer, USA, tercera edición, 2008.
- [47] S. Niessen. Fann (fast artificial neural network library). leenissen.dk/fann/wp/.
- [48] M. Payeras. *Latitud de la flor y del granizo*. Editorial Piedra Santa, sexta edición, 2006.
- [49] R. R. Pennington, D. E. Prado, and C. A. Pendry. Neotropical seasonally forests and quaternary vegetation changes. *J. Biogeogr.*, 27:261–273, 2000.
- [50] B. C. Pijanowski, D. G. Brown, B. A. Shellito, and G. A. Manik. Using neural networks and gis to forecast land use changes: a land information model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26:553–575, 2002.

- [51] R. Rojas. *Neural Networks A Systematic Introduction*. Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [52] R. Rosen. *Essays on life itself. complexity in ecological systems series*, 2000.
- [53] G. A. Sánchez-Azofeifa, M. Quesada, P. Cuevas-Reyes, A. Castillo, and G. Sánchez-Montoya. Land cover and conservation in the area of influence of the chamela-cuixmala biosphere reserve, mexico. *Forest Ecology and Management*, 258:907–912, 2008.
- [54] S. Sánchez-Colón, A. Flores-Martínez, I. A. Cruz-Leyva, and A. Velázquez. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. In *Capital natural de México*, volume II: Estado de conservación y tendencias de cambio, páginas 75–129. Conabio, 2009.
- [55] S. B. Serpico and F. Roli. Classification of multisensor remote-sensing images by structured neural networks. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 33(3):562–578, 1995.
- [56] F. Serrano. *Sobre la dinámica de usos de suelo en el entorno urbano: modelado y simulación*. Tesis de Maestría, CentroGeo, 2008.
- [57] B. S. Soares-Filho, G. C. Coutinho-Cerqueira, and C. Lopes-Pennachin. Dinamica-a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154:217–235, 2002.
- [58] W. Tobler. A computer movie simulating urban growth in the detroit region. *Economic Geography*, 46:234–240, 1970.
- [59] I. Trejo and R. Dirzo. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in mexico. *Biol. Conserv.*, 94:133–142, 2000.
- [60] M. G. Turner, R. H. Gardner, and R. V. O’Neill. *Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process*. Springer-Verlag New York, 2001.
- [61] A. Veldkamp and L. O. Fresco. Clue: a conceptual model to study conversion of land use and its effects. *Ecological Modelling*, 85:253–270, 1996.
- [62] P. H. Verburg and K. P. Overmars. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in europe with the dyna-clue model. *Landscape Ecol*, 24:1167–1181, 2009.

-
- [63] J. Von Neumann. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press Champaign, IL, USA, 1966.
- [64] M. Wall. genetic algorithms library. <http://lancet.mit.edu/ga/>.
- [65] F. Wang. The use of artificial neural networks in a geographical information system for agricultural land-suitability assesment. *Environment and Planning A*, 26:265–284, 1994.
- [66] R. White and G. Engelen. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land use patterns. *Environment Planning A*, 25:1175–1199, 1995.

Manual de uso para el módulo

r.mgenerator.

El texto que sigue a continuación trata los diferentes aspectos relacionados con la instalación y uso de las diferentes funcionalidades implementadas hasta el momento. La interfaz fue generada en inglés para mantener el estándar de los módulos programados en GRASS, además de no limitar su uso a países hispano-hablantes. No obstante, es posible generar traducciones a diferentes idiomas usando el API de GRASS para generar interfaces, lo cual se deja para un trabajo posterior. En lo que se trata a continuación se usó una versión reducida de la aplicación que muestra únicamente las funciones que se consideran acabadas. Dentro del código se pueden encontrar otras funciones “avanzadas” que determinan parámetros de configuración más específicos, los cuales se están evaluando para su introducción, de ser útiles.

A.1. Instalación.

Por el momento, el módulo tiene como única dependencia la instalación de la biblioteca FANN, además del core de GRASS. Por otro lado, el entorno en el que fue desarrollado el proyecto es un sistema operativo Linux, de manera que su instalación en otros sistemas no será abordada. No obstante, en el procedimiento que se explica a continuación se incluyen alternativas usando código fuente, las cuales deberían de ser suficientes para su instalación en otros sistemas, sin tomar en cuenta las dependencias específicas.

A.1.1. Instalación de FANN.

En Ubuntu y Debian:

```
>sudo apt-get install fann
```

En otros sistemas operativos o para instalar versiones más actualizadas de la biblioteca:

- Obtener el código fuente de la biblioteca descargándolo de la página oficial del proyecto (la versión actual es 2.2.0): <http://leenissen.dk/fann/wp/download/>

- La instalación requiere del paquete “cmake”, el cual se instala de diferentes maneras en cada sistema operativo bajo un procedimiento sencillo. En el caso de Ubuntu:

```
>sudo apt-get install cmake
```

- Para instalar la biblioteca a partir del código fuente: navegar hasta la carpeta donde se descargó el archivo comprimido y descomprimir la carpeta; navegar al interior de la carpeta resultante; compilar e instalar usando los siguientes comandos (la descompresión se puede realizar también a través de la interfaz):

```
>cd /*ruta al directorio de descarga*
```

```
>unzip FANN-2.2.0-Source.zip
```

```
>cd FANN-2.2.0-Source
```

```
>cmake .
```

```
>sudo make install
```

Instalación del módulo.

El código fuente del módulo estará disponible para su descarga a la brevedad posible en la página de **SourceForge**: <http://sourceforge.net/>. Por el momento, se puede solicitar directamente escribiendo a la dirección: *everardo.robredo@gmail.com*, para obtener la versión beta.

Abrir una terminal, navegar hasta la carpeta donde se descargó el archivo y descomprimir:

```
>cd /*ruta al directorio de descarga*
```

```
>unzip r.mgenerator.zip
```

Navegar al interior de la carpeta, compilar e instalar el código:

```
>cd r.generator
```

```
>sudo make MODULE_TOPDIR=/*ruta a la fuente de GRASS*/grass
```

```
>sudo make MODUL_TOPDIR=/*ruta a la fuente de GRASS*/grass
install
```

A.2. Uso de la aplicación.

El módulo puede ser usado directamente como un comando que especifica todas las instrucciones en la terminal dentro del ambiente de GRASS, con lo que puede ser enlazado en scripts de python o shell, o a través de la interfaz gráfica de usuario (gui, por sus siglas en inglés). Para invocar la gui se escribe el siguiente comando en la terminal, dentro del ambiente de GRASS, o en la consola de comandos de la interfaz gráfica de GRASS:

```
>r.mgenerator
```

Con este comando se abrirá la ventana del módulo que se ve en la figura A.1. Esta interfaz es un estándar de GRASS y aquí se presenta en su versión de wxpython, aunque también existe una versión en tcl/tk con un aspecto más anticuado que está en desuso. En cada caso de uso, para correr el comando se presiona el botón “Run” de la interfaz.

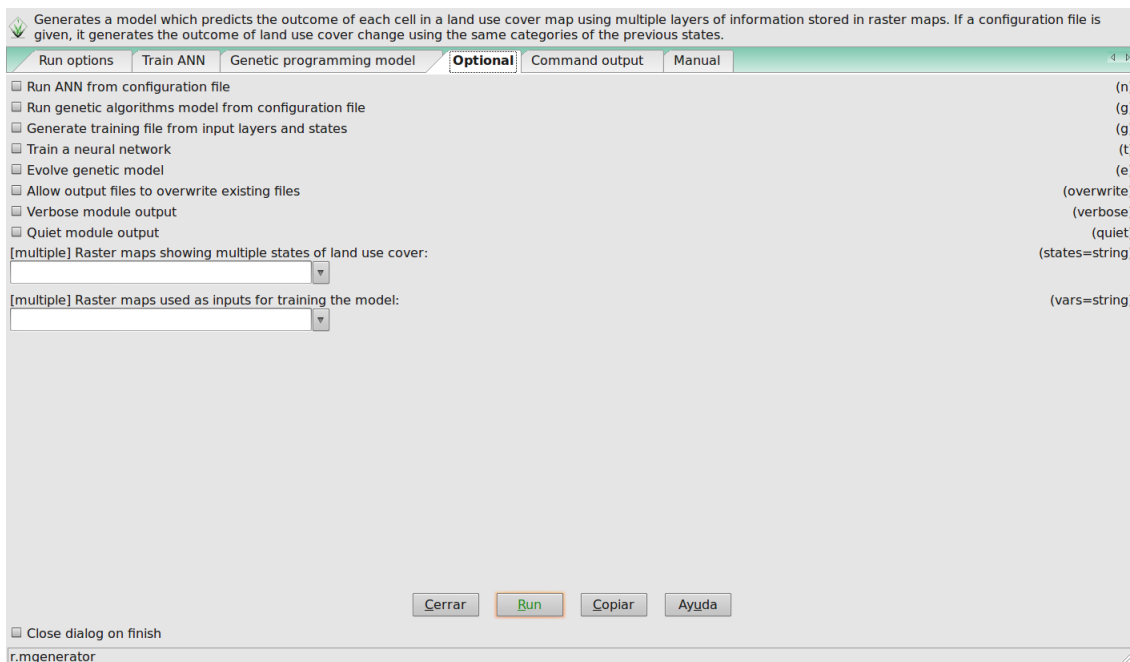


Figura A.1: Aspecto de la interfaz gráfica de usuario de acuerdo al estándar de GRASS en wxpython.

A.2.1. Aplicación de Redes Neuronales Artificiales

Generación del archivo de entrenamiento para la red

Para generar un modelo de RNA's primero es necesario crear un archivo que contiene los patrones de entradas y salidas esperadas con los que será entrenará la red. Este archivo se construye con los mapas de diferentes estados de cambio de uso de suelo así como con las variables que en el modelo determinarán las transiciones. El formato de dicho archivo sigue el estándar de FANN, por lo que puede ser generado de forma independiente. Por otro lado, el uso del módulo es sensible a la presencia de máscaras ráster dentro del ambiente GRASS, con lo que se pueden crear archivos de entrenamiento que contengan patrones de entrenamiento específicos para algunos fragmentos del mapa. La especificación de los datos de entrada en la interfaz se introduce en la pestaña "Optional" en los campos correspondientes, en donde debe indicarse también que se generará un archivo de entrenamiento seleccionando la opción "Generate training file from input layers and states", como se ve en el ejemplo de la figura A.2a. El sufijo "@usuario" sirve para indicar en GRASS que se usará la versión del mapa que se ubica en el *mapset* "usuario". Si el *mapset* del ambiente de trabajo actual es este mismo, puede omitirse ¹. El nombre del archivo de salida se especifica en la pestaña "Train ANN" dentro del campo que tiene la descripción "Write training patterns to this file", como se ve en el ejemplo de la figura A.2b. Si se introduce el nombre del archivo de esta manera, este será guardado en la carpeta actual donde está corriendo el ambiente. El botón "Browse" abre una ventana para seleccionar una carpeta alternativa para guardar las salidas.

El archivo de texto plano generado tiene la siguiente aspecto:

```
65570 4 4

3 2.000000 0.000000 0.000000

1 0 0 0

3 2.000000 0.236256 49.613483

1 0 0 0
```

¹Para una explicación completa de la estructura de datos de GRASS, consultar [46]

```
3 2.000000 0.236256 49.613483
```

```
1 0 0 0
```

```
3 3.000000 0.354384 49.825054
```

```
1 0 0 0
```

```
3 3.000000 0.354384 50.087330
```

```
1 0 0 0
```

```
3 3.000000 0.118128 50.267593
```

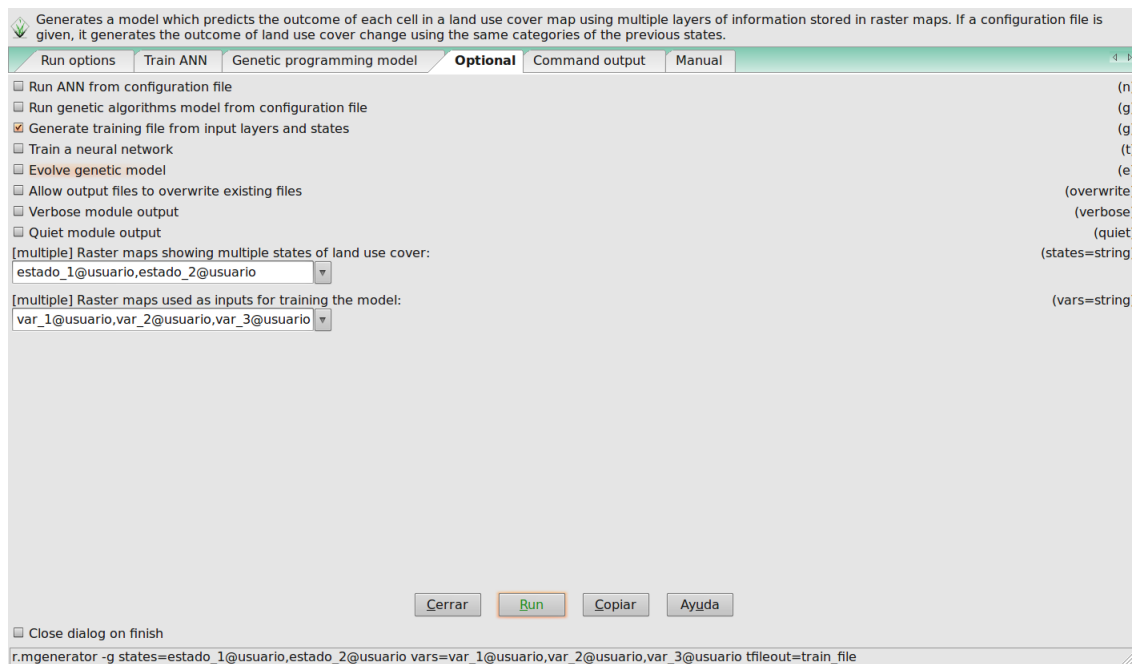
```
1 0 0 0
```

```
.  
.
.
```

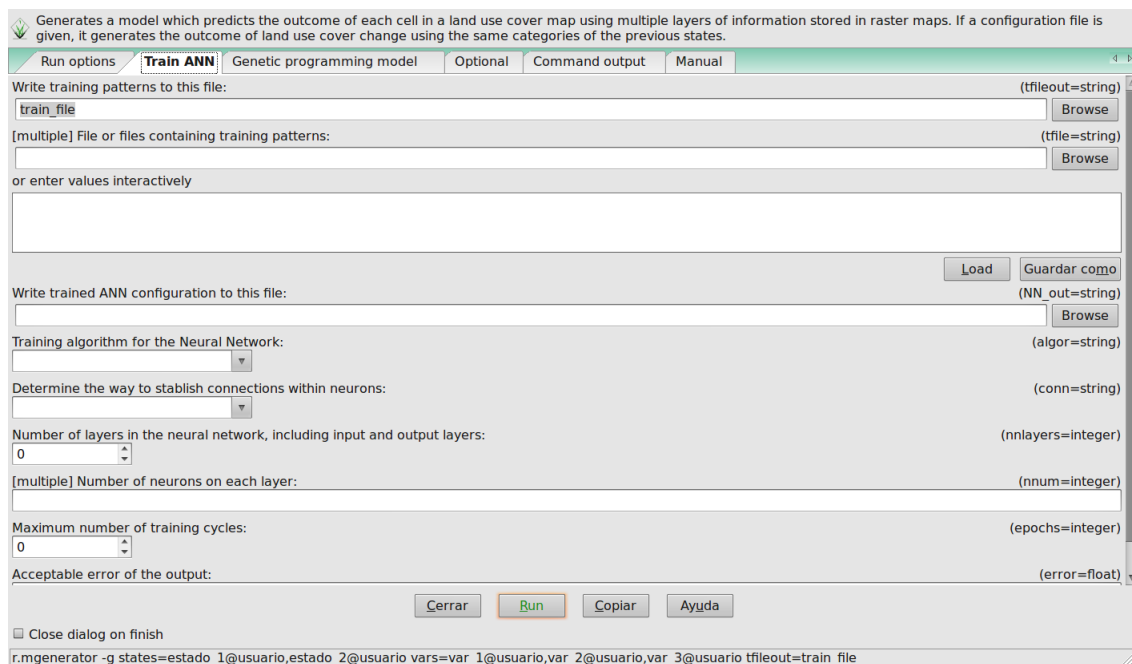
La primera línea o encabezado nos dice que hay 65570 patrones de entrenamiento con cuatro variables de entrada y cuatro posibles estados de salida, que en este caso serían 1000=1, 0100=2, 0010=3 y 0001=4. La codificación de los estados de salida no es en binario, únicamente sirve para decirle a las funciones de la biblioteca FANN que tipo de salida se espera para una capa de salida de cuatro neuronas en la red (es decir, la salida que debería de producir cada neurona en esta capa). Por ejemplo, la primera línea después del encabezado nos dice que el estado inicial de uso de suelo es 3 y que los valores de var1, var2 y var3 son 2, 0 y 0, respectivamente, dando como resultado un estado final de salida esperado de 1000, que es la categoría 1 (o, salida 1 para la neurona 1 de la capa de salida y 0 para todas las demás neuronas de la capa de salida, esto quiere decir que pertenece a la primera categoría, mientras que 0100 querría decir que pertenece a la segunda categoría).

El comando correspondiente en terminal para generar el mismo comportamiento, el cual se puede ver en la parte inferior de la interfaz, es el siguiente:

```
>r.mgenerator -g states=estado_1@usuario,estado_2@usuario  
vars=var_1@usuario,var_2@usuario,var_3@usuario  
tfileout=train.file
```



(a)



(b)

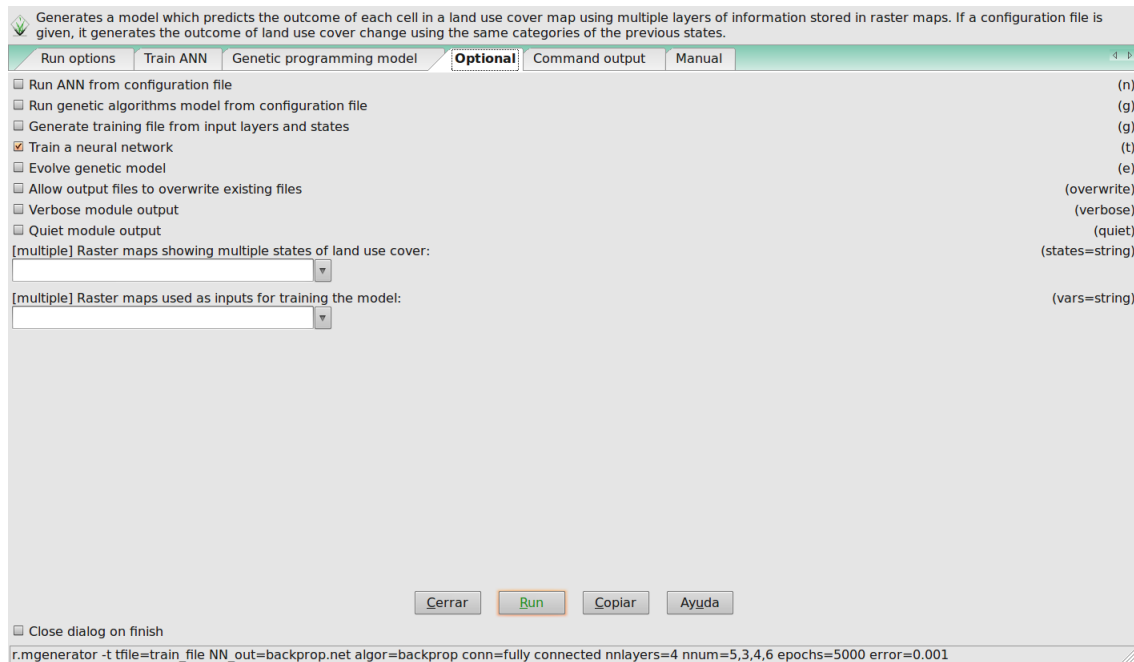
Figura A.2: Generación del archivo de patrones de entrenamiento para la red neuronal mediante la interfaz gráfica de usuario.

Entrenamiento de la red.

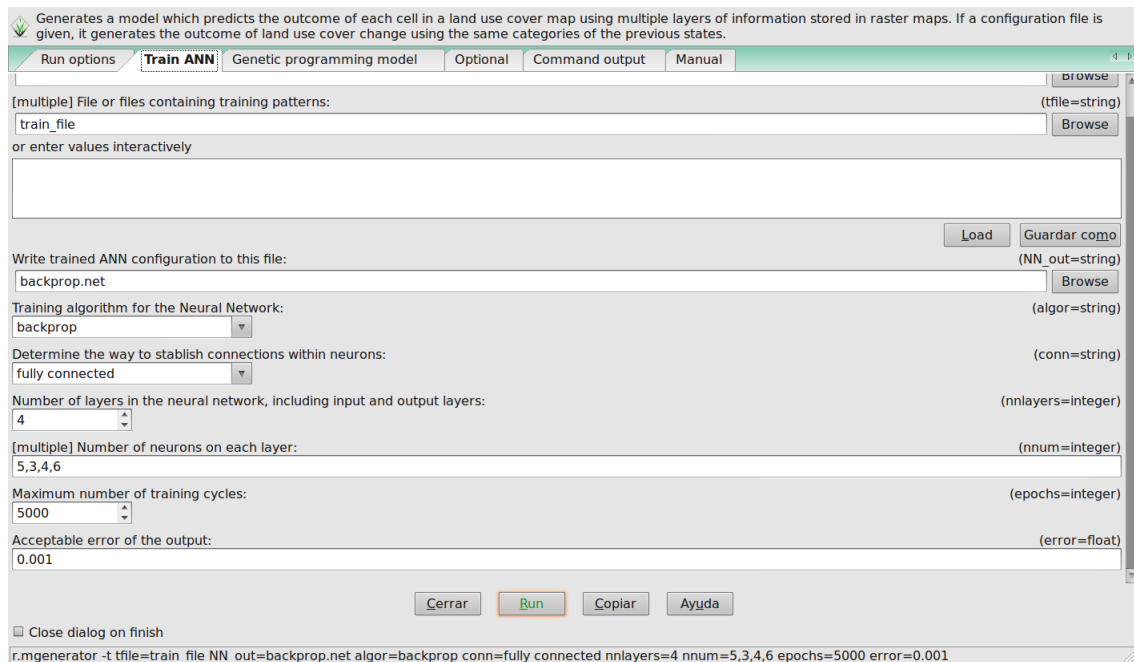
Una vez generado el archivo de patrones, se puede proceder al entrenamiento de la red. Aquí se abordará únicamente el entrenamiento por el algoritmo de retropropagación ya que el algoritmo entrenamiento de la red con algoritmos genéticos que se tiene hasta el momento es muy costoso en términos computacionales y debe ser mejorado, como ya se discutió.

Para entrenar la red debe seleccionarse la opción “Train neural network“ de la pestaña “Optional“, como se observa en la figura A.3a. En la figura A.3b se muestra un ejemplo de configuración que a continuación se describe:

Para especificar el uso del algoritmo de retropropagación se selecciona la opción “backprop” del campo “Training algorithm”. La topología de la red debe ser dada desde el inicio, ya que, como se explicó en el cuerpo de la tesis, se implementaron únicamente redes de proalimentación, las cuales tienen topología fija. Para construir una red de 4 capas se introduce este número en el campo “Number of layers in the neural network, including input and output layers” y para determinar que debe haber, 5 neuronas en la capa de entrada, 3 en la primera capa interna, 4 en la segunda capa interna y 6 en la capa de salida se introduce “5,3,4,6” en el campo “Number of neurons in each layer”. El campo “Determine the way to establish connections within neurons” se usa para especificar si se usará la topología completa, es decir, si entre cada capa, todas las neuronas están conectadas, que corresponde a la opción “fully connected”, o si únicamente algunas neuronas se encuentran conectadas, correspondiente a la opción “sparsely connected”. En caso de aplicación se usó la opción “fully connected” y es la que se recomienda por desempeño. Además, el usuario debe determinar el nombre del archivo donde se encuentran los patrones de entrenamiento, el nombre del archivo que será creado para guardar la configuración de la red neuronal, el número de ciclos de entrenamiento y un error aceptable para la red neuronal, que corresponden a los campos “File or files containing training patterns“, “Write trained ANN configuration to this file“, “Maximum number of training cycles“ y “Acceptable error“, respectivamente. Estas dos últimas entradas determinan la orden de paro para el entrenamiento: si el número de ciclos de entrenamiento excede al determinado como máximo o si el error se minimiza al grado de ser menor o igual al aceptable, el algoritmo para y se escribe la configuración. Además, en cada iteración dentro del entrenamiento, se genera un archivo de respaldo de nombre “backup.net“ que contiene la configuración de la red neuronal hasta el momento. Durante el entrenamiento, se abre un graficador implementado en gnuplot (ver figura A.4) que muestra el error alcanzado al momento de la iteración correspondiente.



(a)



(b)

Figura A.3: Configuración de la aplicación para entrenar una red neuronal con el archivo de patrones previamente generado.

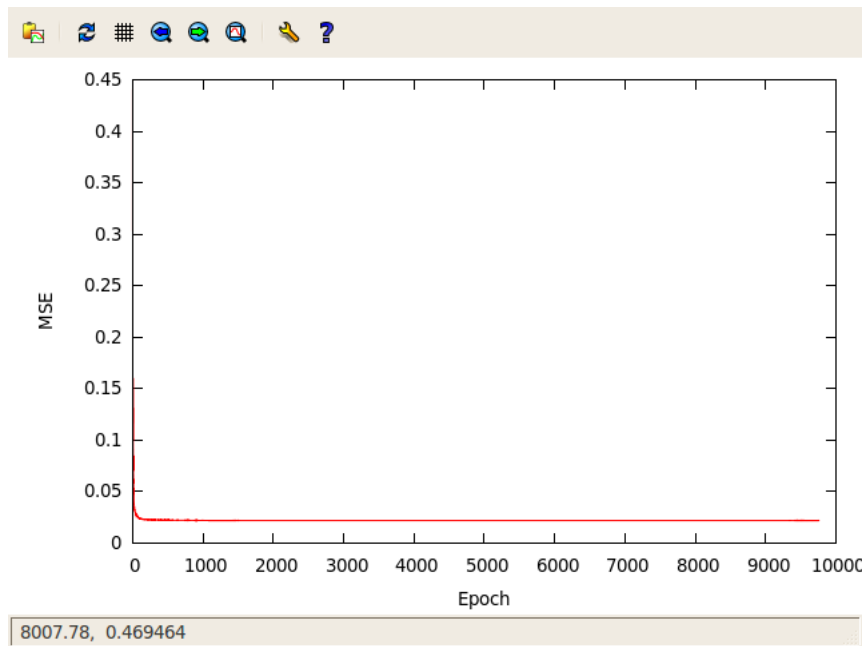


Figura A.4: Graficador de error que se abre y actualiza en tiempo real durante la ejecución.

El código que corresponde al ejemplo en la terminal es el siguiente:

```
>r.mgenerator -t tfile=train_file NN_out=backprop.net
algor=backprop conn=fully connected nlayers=4 nnum=4,3,3,6
epochs=5000 error=0.001
```

A.3. Aplicación de algoritmo de operadores multigraduados.

Entrenamiento

Al igual que en el algoritmo de RNA's el uso del algoritmo de operadores multigraduados requiere de un proceso de entrenamiento en el que se captura el comportamiento de las transiciones. En este caso, no es necesario crear archivos de patrones ya que toda la información necesaria se obtiene directamente de los mapas. Para acelerar este, todos los mapas son guardados en *cache*, de manera que el usuario debe tener la memoria RAM suficiente para dicho proceso. Afortunadamente, el formato que usa GRASS para guardar los mapas es muy ligero y, como ejemplo, para el total de 20 mapas usados en la aplicación

del caso de estudio se usaron 700 Mb de memoria RAM durante la ejecución.

Para indicar que se entrenará un modelo con el algoritmo de operadores multigraduados debe seleccionarse la opción "Evolve genetic model" en la pestaña "Optional" de la interfaz, además de seleccionar los mapas de estado de uso de suelo y las variables asociadas según el modo de uso ya planteado en la sección de aplicación de RNA's figura A.5a. La configuración del entrenamiento se especifica en la pestaña "Genetic programming model" que se muestra en la figura A.5b con los parámetros que se explican a continuación.

El campo "Population size" indica el número de individuos que se usarán durante el proceso evolutivo. Este número puede variar mucho pero se recomienda una cifra mayor o igual a 10. Un número muy pequeño arroja resultados pobres y un número muy grande puede hacer el proceso muy lento. Los campos "Number of generations" y "Acceptable fitness", determinan el número máximo de generaciones y la adecuación aceptable, respectivamente, y son los criterios de paro para el algoritmo: si se alcanza el número máximo de generaciones o la adecuación del individuo más apto es mayor o igual a la adecuación aceptable, el algoritmo para.

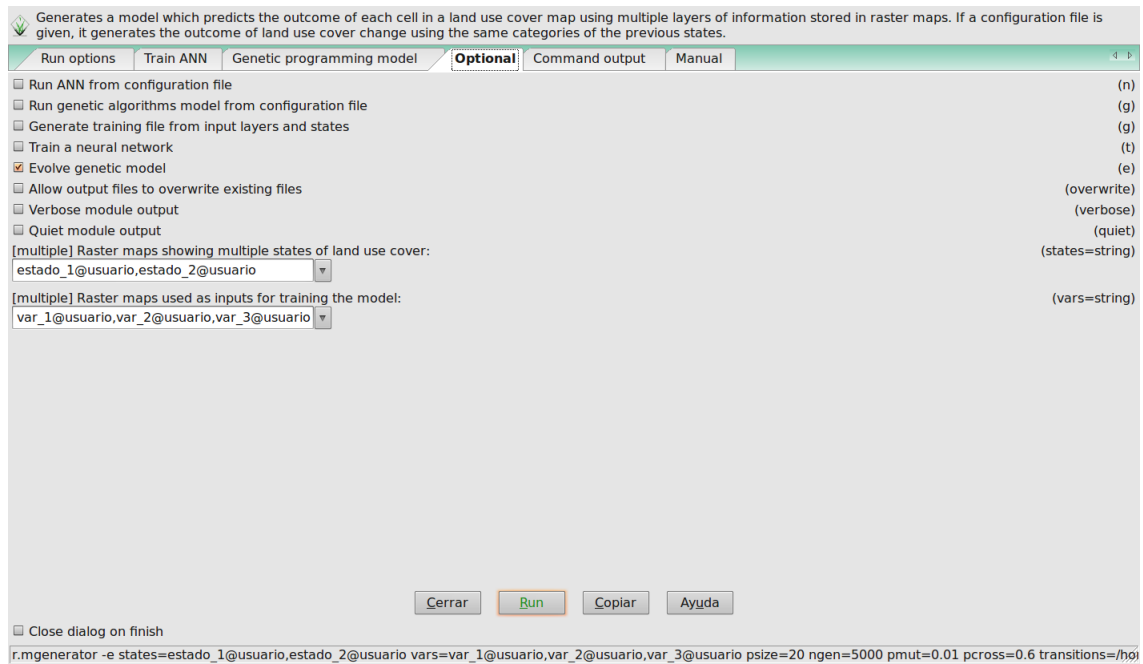
Las probabilidades de mutación y recombinación se especifican en los campos "Mutation probability" y "Crossover probability", respectivamente. Los valores introducidos determinan en gran medida el comportamiento del proceso y cada caso requiere de configuraciones diferentes para lo cual es necesario hacer pruebas. En el caso de estudio utilizado, el mejor comportamiento se obtuvo con un 0.01 de probabilidad de mutación y 0.6 de probabilidad de recombinación. Existen casos en los que puede llegar a estancarse el algoritmo girando alrededor de un óptimo local, por lo cual se introdujo una función que calcula la desviación estándar de las adecuaciones de todos los individuos. Si el valor de la desviación es muy pequeño, la tasa de mutación se eleva en una generación para introducir nuevas variaciones y posteriormente regresa a su valor original.

En el campo "Allowed category transitions" se especifica el nombre o la ruta de un archivo de texto plano, previamente creado por el usuario, que contiene las transiciones para las que se generarán los umbrales correspondientes durante el proceso de entrenamiento. El formato del archivo debe ser algo similar a lo siguiente:

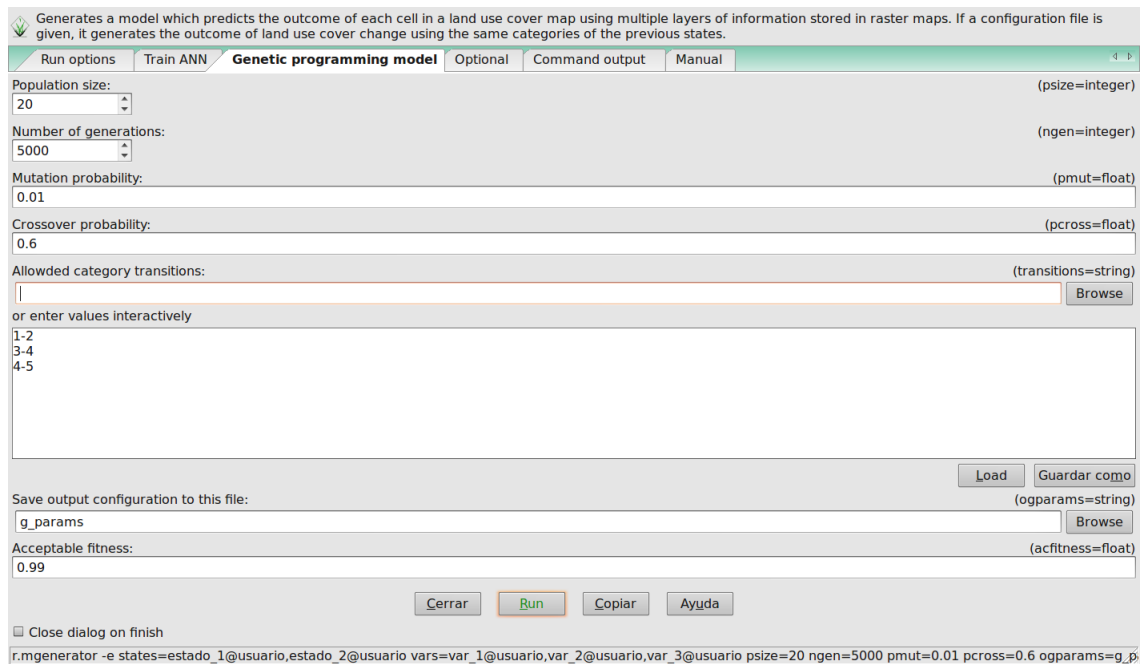
1-2

3-4

4-5



(a)



(b)

Figura A.5: Configuración de la aplicación para calibrar un modelo de operadores multigraduados.

Esta configuración indica que se calibrarán las transiciones de la cobertura 1 a la 2, de la 3 a la 4 y de la 4 a la 5. Todas las transiciones que no se incluyan no serán calibradas y el valor se considerará constante. En la figura b se usa una alternativa que se implementó en la interfaz de wxpython, la cual consiste en introducir de forma interactiva los valores de configuración en lugar de usar un archivo de texto previamente creado. La configuración introducida se puede guardar para ser usada como archivo posteriormente, de acuerdo a la explicación anterior.

En el campo "Save output configuration to this file" se especifica el archivo de salida que contendrá los valores de los umbrales resultantes de la calibración. En cada generación, este archivo es regenerado, por lo que siempre se tiene una copia de seguridad en caso de alguna falla. De forma similar al algoritmo de RNA's, durante el proceso de entrenamiento se abre un graficador que muestra la adecuación del individuo más apto hasta el momento (ver figura A.6).

El comando para lograr el mismo comportamiento que la configuración mostrada en la figura b es el siguiente:

```
>r.mgenerator -e states=estado_1@usuario,estado_2@usuario
vars=var_1@usuario,var_2@usuario,var_3@usuario psize=20
ngen=5000 pmut=0.01 pcross=0.6 ogparams=g_params acfitness=0.99
```

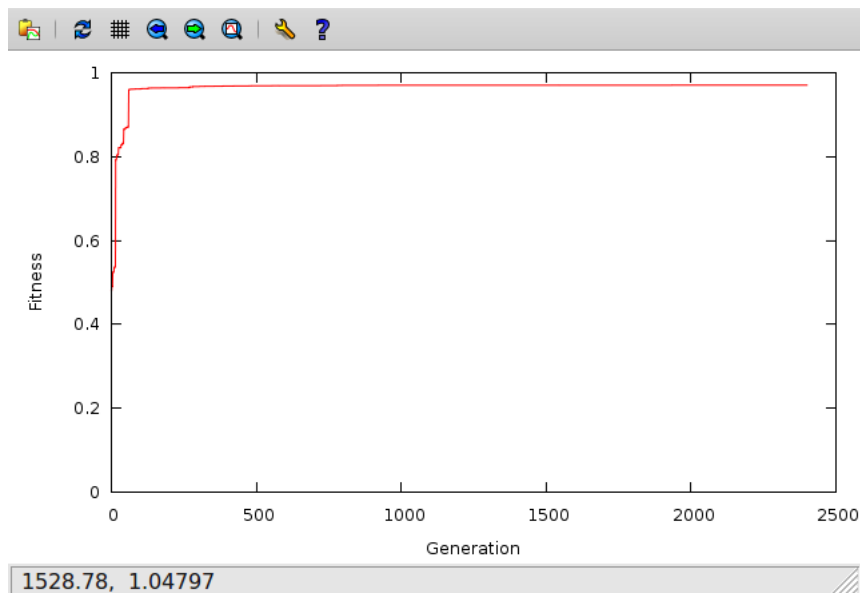


Figura A.6: Graficador de adecuación que se abre y actualiza en tiempo real durante la ejecución.

A.4. Ejecución de simulaciones

Una vez generados los modelos por cualquiera de los métodos anteriores, se pueden producir simulaciones basadas en conjuntos de datos de entrada diferentes. Estos conjuntos definen estados en la serie de tiempo así como escenarios diferentes determinados por el componente de las variables. Es necesario señalar que el orden de las variables es importante al momento de correr las distintas simulaciones y debe ser el mismo que se utilizó durante el proceso de entrenamiento. Para generar simulaciones con cualquier modelo se debe especificar el estado de uso de suelo que se tomará como base para la simulación en el campo "Raster map showing current state of land use cover", además del mapa de salida producido por la simulación en el campo "Raster map showing predicted land use cover" y las variables de entrada dentro del campo "Input variables to run the simulation".

En el caso de un modelo de RNA's, el archivo de configuración se especifica en el campo "File containing ANN configuration" (figura A.7a), mientras que para correr un modelo de operadores multigraduados se usa el campo "File containing tresholds (genetic)" para indicar el archivo de umbrales que se usará (figura A.7b). Además debe seleccionarse alguno de las opciones para correr los modelo, ya sea "Run ANN from configuration file" o "Run genetic algorithms model from configuration file", de la misma manera que con las opciones anteriores.

Los comandos correspondientes son los siguientes:

(RNA)

```
>r.mgenerator -n NN_in=backprop.net input=estado_2@usuario
current_vars=var_1@usuario,var_2@usuario,var_3@usuario
output=simulacion_NN
```

(Operadores multigraduados)

```
>r.mgenerator -s igaparms=g_params input=estado_2@usuario
current_vars=var_1@usuario,var_2@usuario,var_3@usuario
output=simulacion_genetic
```

Generates a model which predicts the outcome of each cell in a land use cover map using multiple layers of information stored in raster maps. If a configuration file is given, it generates the outcome of land use cover change using the same categories of the previous states.

Run options Train ANN Genetic programming model Optional Command output Manual

File containing ANN configuration: (NN_in=string)

or enter values interactively

File containing thresholds (genetic): (igaparms=string)

or enter values interactively

Raster map showing current state of land use cover: (input=string)

[multiple] Input variables to run the simulation: (current_vars=string)

Raster map showing predicted land use cover change: (output=string)

[multiple] Categories to keep fixed in output map (water for example): (fixcat=integer)

Close dialog on finish

r.mgenerator -n NN_in=backprop.net input=estado_2@usuario current_vars=var_1@usuario,var_2@usuario,var_3@usuario output=simulacion_NN

(a)

Generates a model which predicts the outcome of each cell in a land use cover map using multiple layers of information stored in raster maps. If a configuration file is given, it generates the outcome of land use cover change using the same categories of the previous states.

Run options Train ANN Genetic programming model Optional Command output Manual

File containing ANN configuration: (NN_in=string)

or enter values interactively

File containing thresholds (genetic): (igaparms=string)

or enter values interactively

Raster map showing current state of land use cover: (input=string)

[multiple] Input variables to run the simulation: (current_vars=string)

Raster map showing predicted land use cover change: (output=string)

[multiple] Categories to keep fixed in output map (water for example): (fixcat=integer)

Close dialog on finish

'r.mgenerator -s igaparms=g_params input=estado_2@usuario current_vars=var_1@usuario,var_2@usuario,var_3@usuario output=simulacion_genetic' copied to clipboard

(b)

Figura A.7: Configuración de la aplicación para correr distintas simulaciones. (a) Correr modelo de redes neuronales; (b) Correr modelo de operadores multigraduados.