



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

MODELACIÓN HISÓRICO-ESPACIAL DE CAMBIO DE COBERTURA/USO DE
SUELO: CALAKMUL

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
LAURA ALFONSINA CHANG MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS
DR. JEAN FRANCOIS MAS CAUSSEL
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM

COMÍTE TUTOR DOCTORAL
DRA. NURIA TORRESCANO VALLE
EI COLEGIO DE LA FRONTERA SUR, CHETUMAL

DR. PEDRO SERGIO URQUIJO TORRES
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM

MORELIA, MICHOACÁN.
AGOSTO DEL 2017



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.

A Dios, por todo, A mis padres, A mi esposo, y a mis hermanos.

Agradecimientos

Agradezco a mi Familia, principalmente a mis padres, de los que siempre he tenido amor y apoyo incondicional, comprensión y sacrificio para permitirme culminar satisfactoriamente el Doctorado en Geografía. Sin su apoyo y motivación nunca lo hubiera logrado. Gracias.

A mi compañero de vida Juan Felipe Charre Medellín, que siempre me anima.

A mi hermanos que siempre me animaron y apoyaron con los imprevistos que puede conllevar hacer un doctorado.

A mi asesor, Dr. Jean François Mas, por su paciencia, amistad, confianza, asesoría y apoyo en todo momento y para la realización de este trabajo. Y a mis compañeros del área de proyectos que contribuyeron en algún momento con su granito de arena en el trabajo y he hicieron más amenos los días de trabajo sector 7G.

A mi comité tutorial la Dra. Nuria Torrescano Valle y el Dr. Pedro Sergio Urquijo Torres, por sus observaciones, sugerencias y consejos para mejorar y concluir este trabajo. De igual forma agradezco a los sinodales, el Dr. Gerardo Alberto Hernández Cendejas y Diego Rafael Pérez Salicrup por su tiempo en la revisión del manuscrito y sus importantes comentarios para fortalecer y presentar los resultados obtenidos de la mejor manera, ya que me permitieron lograr un documento mejor estructurado.

Agradezco al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA-UNAM), por el apoyo y por abrir un espacio para que pudiera realizar la investigación doctoral. Agradezco también a la Coordinación de Posgrado de la Facultad de Filosofía y Letras, así como a la Coordinación del Posgrado en Geografía por su amable disposición, la orientación oportuna y la paciencia para poder culminar satisfactoriamente este proceso.

A la Secretaría de Educación Pública y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento del proyecto ¿Puede la modelación espacial ayudarnos a entender los procesos de cambio de cobertura/uso del suelo y de degradación ambiental? (SEP-CONACyT CB-2012- 01-178816), en el que estaba incluida esta investigación doctoral. Y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca N°. 239247 otorgada, sin el cuál hubiera sido imposible culminar este trabajo.

También agradezco a la Dra. Silvana Martén Rodríguez y el Dr. Marten Scheffer por los consejos y la asesoría en el proyecto de tesis durante la estancia realizada en la Uiversidad de Wageningen, en Wageningen, Güeldres, Países Bajos.

Gracias a cada una de las personas que me apoyaron e hicieron que este sueño se cristalizara en una hermosa realidad.

Índice general

Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	XI
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. MODELACIÓN DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO HISTÓRICO: UNA MIRADA DESDE LOS ENFOQUES ACTUALES.	4
1.1. Introducción	4
1.2. Modelos contemporáneos	6
1.2.1. Insumos	8
1.2.2. Entrenamiento o calibración del modelo	9
1.2.3. Simulación	10
1.2.4. Evaluación del modelo	10
1.3. Modelos de CCUS históricos	11
1.3.1. Objetivos	14
1.3.2. Insumos	14
1.3.3. Entrenamiento/simulación	15
1.3.4. Validación	17
1.4. Discusión	18
1.5. Conclusiones	20
2. MODELACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE UN SISTEMA ROZA-TUMBA-QUEMA	22
2.1. Introducción	22
2.2. Materiales	24
2.3. Métodos	24
2.3.1. Modelo <i>Roza-Tumba-Quema</i>	24

Submodelo <i>CCUS</i>	25
Submodelo <i>Productividad</i>	27
Submodelo <i>Previsión</i>	27
Submodelo <i>Crecimiento Poblacional</i>	28
Submodelo <i>Erosión-Productividad</i>	28
2.3.2. Modelo <i>Índice de integridad</i>	29
2.3.3. Parámetros utilizados	31
2.4. Resultados	31
2.4.1. Cambios de cubierta y uso del suelo	32
2.4.2. Integridad del paisaje	38
2.5. Discusión	39
2.6. Conclusiones	41
3. SIMULACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO EN EL REINO DE CALAKMUL DURANTE EL CLÁSICO TARDÍO (600-900 D.C.)	43
3.1. Introducción	43
3.2. Antecedentes	45
3.2.1. Calakmul Clásico Tardío (600-900 D.C.)	45
3.2.2. Ocupación y distribución de pueblos Mayas en la región de Calakmul	46
3.2.3. Población	47
3.2.4. Sistemas agrícolas, alimentación y uso de los recursos	48
Terrazas	49
Camellones o Campos elevados	49
Otros sistemas intensivos	50
Alimentación y uso de los recursos	51
Los Chultunes	52
3.3. Área de estudio	53
3.3.1. Descripción física del área de estudio	56
3.3.2. Suelos del área de estudio	56
3.4. Objetivo	59
3.4.1. Objetivos específicos	59
3.5. Materiales y Métodos	59
3.5.1. Modelo <i>CCUS Calakmul</i>	59
3.5.2. Modelo <i>Sistemas agrícolas</i>	60
3.5.3. Distribución de asentamientos Mayas en el área de estudio	61

3.5.4.	Generación de los datos de precipitación y déficit de producción	63
3.5.5.	Características del suelo	63
3.5.6.	Análisis de polen fósil	64
3.6.	Resultados	67
3.6.1.	Coefficiente de erosión	67
3.6.2.	Datos de precipitación y déficit de producción	67
3.6.3.	Distribución de los asentamientos humanos	68
3.6.4.	Parámetros del modelo CCUS Calakmul	71
3.6.5.	Escenarios con agricultura Roza, Tumba y Quema	72
3.6.6.	Escenarios con agricultura Roza, Tumba y Quema y agricultura intensiva	75
	Escenarios con agricultura R-T-Q y agricultura intensiva en asentamientos dispersos	75
	Escenarios con agricultura R-T-Q y agricultura intensiva en asentamientos alta-	
	mente concentrados alrededor de los centros	80
3.6.7.	Escenarios con agricultura intensiva (<i>Bosque artificial y/o Acolchado</i>)	83
3.6.8.	Análisis de polen fósil	88
	Aguada Oxpemul	88
	Chumpich, Uxul	90
3.7.	Discusión	94
3.8.	Conclusiones	98
 CONCLUSIONES GENERALES		99
 Anexo 1		102
 Anexo 2		107
 BIBLIOGRAFÍA		108

Índice de figuras

1-1. Distribucion espacial de los modelos de CCUS revisados. Referencias: 1. Axtell <i>et al.</i> (2002); 2. Barton <i>et al.</i> (2010); 3. Etter <i>et al.</i> (2008); 4. Fedick (1995); 5. Gaillard <i>et al.</i> (2008); 6. Griffin y Stanish (2007); 7. Kohler <i>et al.</i> (2012b); 8. Lemmen (2010); 9. Li <i>et al.</i> (2009); 10. Poska <i>et al.</i> (2008); 11. Rogers <i>et al.</i> (2012); 12. Yu <i>et al.</i> (2012). Williams (2000) incluye en su estudio todo Europa (mostrado como área sombreada en el mapa). . . .	12
1-2. Escala espacial y temporal de la revisión de los modelos de CCUS historicos revisados. Los tres grupos de modelos tienden a asociarse con diferentes escalas. Referencias: 1. Axtell <i>et al.</i> (2002); 2. Barton <i>et al.</i> (2010); 3. Boyle <i>et al.</i> (2011); 4. Etter <i>et al.</i> (2008); 5. Fedick (2012); 6. Goldewijk (2001); 7. Gaillard <i>et al.</i> (2010); 8. Goldewijk y Ramankutty (2004); 9. Griffin y Stanish (2007); 10. Hurtt <i>et al.</i> (2011); 11. Kaplan <i>et al.</i> (2009); 12. Kaplan <i>et al.</i> (2012); 13. Kohler <i>et al.</i> (2012b); 14. Lemmen (2010); 15. Li <i>et al.</i> (2009); 16. Olofsson y Hickler (2008); 17. Pongratz <i>et al.</i> (2008); 18. Poska <i>et al.</i> (2007); 19. Rogers <i>et al.</i> (2012); 20. Ruddiman y Ellis (2009b); 21. Williams (2000); 22. Yu <i>et al.</i> (2012)	13
2-1. Esquema general del modelo de CCUS.	25
2-2. Relación entre variables medioambientales y probabilidad de desmonte (transición de bosque a milpa).	26
2-3. Relación entre variables medioambientales y probabilidad de abandono de un cultivo (transición de milpa a bosque).	26
2-4. Cambio temporal de la productividad en cultivos (izquierda) y acahuales con diferentes entornos forestales (derecha).	27
2-5. Ecuación RUSLE.	29
2-6. Cálculo del índice de integridad para una celda. Cada cuadro representa un año en cultivo (gris) o vegetación secundaria (verde).	30
2-7. Cubiertas agrícolas y forestales (bosque conservado y acahuales) modeladas después de 50 iteraciones con las tres densidades poblacionales. Tamaño de pixel una hectárea.	33

2-8. Edad de los acahuales al final de la iteración 50. Los acahuales mayores a 20 años incluye el bosque que nunca ha sido milpa.	34
2-9. Porcentaje de superficie ocupado por acahuales de distintas edades después de 50 iteraciones.	35
2-10. Porcentaje del área de milpas de diferentes clases de productividad después de 50 iteraciones.	36
2-11. Evolución temporal de algunas variables describiendo el sistema R-T-Q. En verde Densidad 1 (0.08 hab/ha), en amarillo Densidad 2 (0.12 hab/ha) y en rojo Densidad 3 (0.18 hab/ha).	37
2-12. Índice de integridad de las cubiertas modeladas después de 50 iteraciones con las tres densidades poblacionales.	38
2-13. Superficie de diferentes clases del índice de integridad para los tres casos de densidad poblacional.	39
3-1. Sistemas agrícolas intensivos.	50
3-2. Conformación de un Chultun según Gallareta-Negrón (2000).	53
3-3. Área de la Civilización Maya del Clásico (Gallareta-Negrón, 2000). <i>Elaboración propia</i> . . .	54
3-4. Glifo Emblema de Calakmul según Marcus (1973) (Folan <i>et al.</i> , 2009).	55
3-5. Ubicación del área de estudio.	55
3-6. Suelos en el área de estudio.	58
3-7. Esquema general del modelo de CCUS-Calakmul.	60
3-8. Esquema general del modelo Sistemas agrícolas.	61
3-9. Precipitación anual desde 810 - 950 D.C. por Medina-Elizalde <i>et al.</i> (2012).	64
3-10. Ubicación de los núcleos de datos palinológicos.	65
3-11. Mapa de tendencia de precipitación.	68
3-12. Modelo de distribución potencial de asentamientos Mayas con MaxEnt.	69
3-13. Patrones de asentamiento.	70
3-14. Escenario con distribución de asentamientos dispersos y agricultura R-T-Q. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1)	73
3-15. Paisaje con la distribución de asentamientos dispersos y agricultura R-T-Q.	74
3-16. Escenario con distribución de asentamientos dispersos y con producción en bajos. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).	77
3-17. Paisaje con asentamientos dispersos y agricultura intensiva en bajos más R-T-Q.	78
3-18. Paisaje con la vegetación en recuperación (acahuales).	79
3-19. Escenario con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y con producción en bajos. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).	81

3-20. Paisaje con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva en bajos más R-T-Q.	82
3-21. Respuesta de la población en las tres distribuciones utilizando agricultura intensiva en bajos y agricultura bosque artificial y/o acolchado	84
3-22. Paisaje con asentamientos dispersos y con agricultura intensiva en bajos y agricultura intensiva mas bosque artificial y/o Acolchado.	85
3-23. Paisaje con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva mas bosque artificial y/o Acolchado.	86
3-24. Paisaje con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva mas bosque artificial y/o Acolchado.	87
3-25. Diagrama de polen fósil encontrado en la Aguada Oxpepul	89
3-26. Modelo de edad Chumpich.	90
3-27. Diagrama de polen fósil del núcleo obtenido en la laguna Chumpich. En azul el periodo Clásico Terminal	91
3-28. Polen fósil de plantas cultivadas.	92
3-29. Polen fósil de plantas cultivadas.	93
3-30. Polen fósil de <i>Zea mays</i>	93
3-31. Escenario con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).	102
3-32. Paisaje con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q.	103
3-33. Escenario con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).	104
3-34. Paisaje con asentamientos asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q.	105
3-35. Escenario con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y con producción en bajos. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).	107
3-36. Paisaje con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva en bajos más R-T-Q.	108

Índice de tablas

1-1. Enfoques de modelación. Modificado de NRC (2014)	8
2-1. Parámetros del modelo	31
3-1. Estimaciones de densidad poblacional.	48
3-2. Prácticas agrícolas intensivas Mayas.	51
3-3. Suelos del área de estudio.	67
3-4. Parámetros usados en los escenarios del modelo.	71
3-5. Año de colapso de la población con R-T-Q. Escenarios AD (Asentamientos dispersos), ACC (Asentamientos altamente concentrado alrededor de los centros) y AMC (Asenta- mientos medianamente concentrado alrededor de los centros).	72
3-6. Edades de Radiocarbono.	90

Modelación histórico-espacial de cambio de cobertura/uso de suelo:

Calakmul

por

Laura Alfonsina Chang Martínez

Resumen

Los procesos de cambio de cobertura y uso de suelo (CCUS) tienen gran impacto sobre los atributos ambientales, incluyendo calidad y cantidad de los recursos disponibles como agua, suelo, aire y demás factores bióticos que se encuentran en combinación dentro del paisaje, teniendo impacto sobre el cambio ambiental global. Debido al poder transformador del CCUS, la comunidad científica y organismos de gobierno iniciaron estudios dedicados a evaluar los cambios actuales. En particular, muchos estudios tienen como objetivo cuantificar las tasas de cambio con herramientas de percepción remota y SIG. El estudio de CCUS se abocó también al análisis y la modelación de los procesos de cambio y en décadas recientes se han generado modelos de simulación de CCUS. Estos permiten entender los procesos de cambio que se llevaron a cabo en el pasado, evaluar y proyectar la evolución del paisaje debido a los CCUS bajo diferentes escenarios. El objetivo de esta tesis es reconstruir la dinámica del paisaje a través de la modelación espacio-temporal, así como probar hipótesis sobre procesos de cambio prehistóricos. La tesis se dividió en cinco secciones: El primer capítulo es la introducción general de la investigación. El segundo capítulo es una revisión, actualmente publicada, que toma de referencia los enfoques de modelación de CCUS contemporáneos para la modelación prospectiva, y los compara con modelos de CCUS de periodos pasados. En esta revisión observamos algunas limitaciones de los modelos de periodos pasados y discutimos el aporte de los enfoques de los modelos contemporáneos. En el tercer capítulo, desarrollamos un modelo de simulación de un sistema Roza Tumba y Quema (R-T-Q) en un contexto actual, en el que se establece la relación entre densidad poblacional, la intensificación de la agricultura y la erosión. Para relacionar los factores de manejo de las parcelas y la conservación del paisaje, utilizamos un índice de integridad (II) propuesto por Ochoa-Gaona *et al.* (2007), este índice toma en cuenta la duración de los períodos de descanso y de cultivo de una parcela así como el número de períodos de cultivo. A menor densidad poblacional, el modelo simula paisaje con mayor integridad. Cuando usamos densidades poblacionales altas, observamos un proceso de intensificación, en el cual el periodo de descanso disminuye y es necesario abrir más parcelas de cultivo. Los acahuales se convierten en milpa antes de alcanzar el tiempo óptimo de descanso para que el suelo recupere su fertilidad y la productividad de los cultivos es menor. En el cuarto capítulo, aplicamos el modelo del sistema R-T-Q al reino de Calakmul durante el Clásico Tardío para poner a prueba el modelo en un contexto de modelación prehispánico. Tomamos insumos provenientes de los estudios arqueológicos, como la densidad poblacional, la distribución de los asentamientos y los datos de precipitación reconstruyendo la variabilidad en el tiempo. También consideramos el registro paleoecológico; tanto para la simulación, como para la validación, identificando la existencia del cultivo a través del análisis palinológico de sedimentos. Finalmente presentamos las conclusiones generales de la tesis en un quinto capítulo.

INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio ambiental global actual es una preocupación mundial y objeto de estudio para muchas investigaciones, donde el aumento de la población humana y el desarrollo tecnológico parecen ser los principales responsables.(Steffen *et al.*, 2006). Sin embargo, los conductores del cambio parecen ser más complejos que eso, ya que existen fuerzas motrices que parten de diversos factores sociales de índole económico y cultural (Lambin *et al.*, 2001; Galicia *et al.*, 2007). El efecto del cambio ambiental global derivado de las alteraciones humanas es diverso y mayormente con impacto negativo en el ambiente, ya que en las últimas décadas se ha observado que existen procesos de defaunación, degradación de los ecosistemas, pérdidas de cosechas y modificaciones en los eventos climáticos (tornados, huracanes, inundaciones y sequías). Donde los cambios en los usos del suelo, son la principal causa de los cambios en el clima local, regional y global (Geist y Lambin, 2001; Acevedo y Delibes-Mateos, 2013). Las tasas de cambio en las últimas décadas se han acelerado y gran parte de las selvas tropicales reportan altas tasas de deforestación en especial en las zonas inter-tropicales (Soares-Filho *et al.*, 2006; Galicia *et al.*, 2007; Wainwright, 2008; Wyman y Stein, 2010). En México se estima que cientos de millones de hectáreas de bosque se han transformado para darles un uso agrícola y pecuario desde 1850 (Mas *et al.*, 2004; Houet *et al.*, 2009; Mas *et al.*, 2011). Mientras que en las proyecciones de cambio climático estimadas para México muestran un panorama bastante desolador, mostrando escenarios donde los ecosistemas empezarán a perder humedad debido al cambio en el patrón de las precipitaciones, generando la conversión de los tipos de vegetación nativa, por ejemplo, los bosques húmedos pasarán a ser bosques subhúmedos, las estepas templadas pasarán a ser matorrales desérticos y los bosques secos templados a bosques tropicales (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1998).

Estos escenarios de cambio climático para México hacen de especial interés la connotación histórica de los procesos de cambio y de las sequías en México. Así como el estudio de la respuesta que las poblaciones humanas del pasado han tenido a estos cambios ambientales. Dentro de las anomalías climáticas, la sequía es considerada a escala mundial como el fenómeno meteorológico más preocupante debido a las variadas formas en las que puede presentarse. Además, existen pocos estudios que expliquen el efecto que puede tener en las sociedades (Garza Merodio, 2007). Las antiguas sociedades contaban con poca capacidad para enfrentar anomalías de este tipo, y hay ejemplos como la meseta del Anáhuac, en donde se han

encontrado reportes de pérdida de granos , debido a irregularidades en la precipitación en el pasado (Garza Merodio, 2007).

Las dinámicas de cambio de uso de suelo presentes en la actualidad, ejercen una presión importante sobre los recursos y sus efectos se pueden ver reflejados en el clima global actual, de tal modo que se ha propuesto un nuevo periodo geológico que asocia las actividades humanas como efectos antropogénicos sobre el planeta denominado Antropoceno (Ruddiman, 2003; Ruddiman y Ellis, 2009b). Esto indica que existe una conciencia sobre la necesidad de anticipar el futuro de los sistemas ambientales de la tierra y en entender las interacciones entre la sociedad y los procesos ambientales dentro de un marco de complejidad (Scheffer *et al.*, 2009).

Una de las principales barreras para la comprensión del cambio ambiental global y sus posibles efectos, es la insuficiente atención prestada a las perspectivas temporales largas sobre el comportamiento complejo del sistema. Estudiar las configuraciones del paisaje en el pasado y las posibles causas de los cambios ambientales pueden aportar ideas acerca del futuro que nos espera, con respecto a los cambios actuales (Dearing *et al.*, 2010). Estudiar las configuraciones del paisaje pasado y la respuesta de los sistemas naturales a la intervención antrópica, así como los efectos de los cambios climáticos a los sistemas socio-ambientales, nos permitirá utilizarlos como análogos para generar teorías de comportamiento genérico de los sistemas, y proporcionará información sobre las propiedades específicas de los sistemas como; (1) tendencias y trayectorias, (2) frecuencias, umbrales y estados alternos, (3) procesos lentos y rápidos y (4) legados y contingencias, como el colapso de sociedades. Las compilaciones y análisis de información y datos pasados sirven de instrumentos para la narrativa de la historia humana y ambiental. La incorporación de información empírica sobre escalas de tiempo en los intentos de definir y modelar el manejo sostenible y adaptable de los sistemas terrestres ahora no sólo es posible, sino también necesario (Parker *et al.*, 2008).

Los procesos de transformación del paisaje del pasado pueden ser estudiados a partir de los modelos de Cambio de Cobertura y Uso del Suelo (CCUS) y los modelos espacialmente explícitos, nos permiten observar procesos de cambio a través del tiempo, con el fin de evaluar la actividad humana y el efecto de los cambios en la propiedades de la superficie terrestre para conocer la historia ambiental de distintos lugares, haciendo posible observar la evolución del cambio en el pasado mostrando la respuesta de las sociedades humanas a condiciones climáticas adversas que las pudieron llevar al colapso (Geist y Lambin, 2001; Axtell *et al.*, 2002; Lambin *et al.*, 2003; Diamond, 2005; Yu *et al.*, 2012; Mas *et al.*, 2014).

Por tal motivo esta investigación tiene como objetivo establecer los lineamientos para una nueva forma de conocer las configuraciones del CCUS del pasado, a través de la modelación espacial. En un inicio con el reconocimiento de los modelos de CCUS que se han realizado para el pasado y que se retoman para compararlos con los del presente, de tal manera que nos permitan un punto de comparación, mostrando

una gama de herramientas que pueden ser utilizadas en la modelación espacial del CCUS del pasado como los softwares disponibles y las variables ambientales, a través de los diferentes enfoques de modelación con los que se puede abordar. Finalmente, la aplicación del modelo en la región de Calakmul, donde la intervención humana y la degradación ambiental a partir de la deforestación y la intensificación del uso de suelo, junto con una serie de sequías, tuvieron gran importancia en el llamado “ Colapso Maya” (Zamora, 1978; Folan *et al.*, 1995).

Para dar cumplimiento con el objetivo planteado, esta investigación está dividida en tres capítulos; el primero es una revisión de los modelos de CCUS que se han realizado para el pasado, los cuales nos permitieron identificar las fortalezas y debilidades que podemos tener cuando se intentan conocer las configuraciones del paisaje en el pasado tratando de retomar como referente los modelos de CCUS del presente. El segundo capítulo es la construcción de un modelo de CCUS, donde el principal motor de cambio es la deforestación por el uso del sistema Roza-Tumba-Quema (R-T-Q), con el fin de utilizar datos del presente para probar el funcionamiento del modelo, y el comportamiento de los parámetros y variables de entrada, así como el paisaje resultante. Por último, en el tercer capítulo el modelo es aplicado en la región de las tierras baja mayas, en el reino de Calakmul durante el Clásico Terminal (800-900 D.C), en el cual existen muchas interrogantes sobre la población y el uso de los recursos, así como las condiciones ambientales en las que se encontraban.

Capítulo 1

MODELACIÓN DE CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO HISTÓRICO: UNA MIRADA DESDE LOS ENFOQUES ACTUALES.

Resumen

Spatially-explicit land cover land use change (LCLUC) models are becoming increasingly useful tools for historians and archaeologists. Such kinds of models have been developed and used by geographers, ecologists and land managers over the last few decades to carry out prospective scenarios. In this paper, we review historical models to compare them with prospective models, with the assumption that the ample experience gained in the development of models of prospective simulation can benefit the development of models having as their objective the simulation of changes that happened in the past. The review is divided into three sections: in the first section, we explain the functioning of contemporary LCLUC models; in the second section, we analyze historical LCLUC models; in the third section, we compare the former two types of models, and finally, we discuss the contributions to historical LCLUC models of contemporary LCLUC models.

1.1. Introducción

Las actividades humanas como la tala, la agricultura o el manejo del fuego, provocan cambios en los atributos ambientales, incluyendo calidad y cantidad de los recursos disponibles e inciden directa e indirectamente en procesos como la desertificación, la pérdida de biodiversidad, las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y el cambio climático (Galicia *et al.*, 2007; Lambin *et al.*, 2003). Estos cambios pueden ser abruptos o, al contrario sutiles (Geist y Lambin, 2001; Lambin *et al.*, 2003; Houet *et al.*, 2009). Los cambios relacionados con la actividad agrícola han sido constantes y con distinta intensidad desde mucho tiempo, pues se sabe que las primeras civilizaciones agrícolas aparecieron hace aproximadamente 8000 años A.P., convirtiéndose en un factor de cambio que merece atención (Redman, 1990). Diversas

investigaciones reconocen que el Cambio de Cobertura/Usos del Suelo (CCUS) y la intensificación de las prácticas agrícolas ante un elevado crecimiento poblacional puede conducir a cambios severos en las condiciones ambientales locales o regionales (Axtell *et al.*, 2002; Bithell y Brasington, 2009), por lo que se puede derivar en problemas de permanencia de las poblaciones (Culbert, 1973; Yoffe y Cowgill, 1991; Geist y Lambin, 2001; Axtell *et al.*, 2002; Haug *et al.*, 2003; Lambin *et al.*, 2003; Beach *et al.*, 2006; Denevan, 2006) y puede llevar al colapso de civilizaciones (Diamond, 2005; Kohler *et al.*, 2005; Springs y Litt, 2007; Turner y Sabloff, 2012; Kohler *et al.*, 2012b).

La información acerca del CCUS del pasado, ayuda a la comprensión del cambio actual y sus consecuencias. Las investigaciones sobre el CCUS contemporáneo son amplias, y reportan que en muchas regiones del mundo la cobertura forestal se está perdiendo y/o degradando de forma acelerada, principalmente en las últimas décadas y en las regiones tropicales (Durán-Medina *et al.*, 2007). Estudios también reconocen que las actividades humanas están involucrados en la mayor parte de estos procesos de CCUS (OECD/FAO; Lambin *et al.*, 2001; Gerber *et al.*, 2013). Un gran número de estudios con base en percepción remota se enfocaron en mapear los cambios y evaluar las tasas de CCUS (Alves y L Skole, 1996; Hansen *et al.*, 2013). Más allá del monitoreo de los cambios otros estudios se abocan a analizar los procesos de CCUS, identificar los drivers y modelar los cambios (Turner *et al.*, 2004; Sanchez y Alonso, 2008). En particular los modelos de simulación de CCUS “espacialmente explícitos” analizan la relación de los cambios y las variables que los influyen (Mas *et al.*, 2011; NRC, 2014) para elaborar mapas de cambio potencial (mapa de probabilidad de cambio) y realizar simulaciones espacio temporales para elaborar mapas prospectivos de cubierta del suelo. Los modelos permiten generar distintos escenarios que ponen a prueba teorías acerca de las causas del cambio. Permiten también realizar proyecciones del efecto de programas gubernamentales para la conservación y/o el aprovechamiento de los recursos. Estas proyecciones se basan en evidencia pasada (pasado reciente) y permiten ajustar escenarios futuros (Soares-Filho *et al.*, 2010; Wyman y Stein, 2010). Por ejemplo, ciertos modelos de CCUS permiten identificar procesos de cambio relacionados con el manejo forestal, las fuerzas biofísicas y económicas que influyen en dichos procesos (Chowdhury, 2006). Otros incluyen, la toma de decisiones de la población local, y la influencia de estas decisiones en la administración de las tierras (Geoghegan *et al.*, 2001). Modelar las condiciones ambientales que influyen en los procesos de cambio es difícil ya que están conformadas por una gran cantidad de variables biofísicas, socioeconómicas y culturales (Axtell *et al.*, 2002; Kohler *et al.*, 2005, 2012b). Estos modelos se aplican desde el nivel de parcelas hasta grandes extensiones y se utilizan para pronosticar y explicar los sistemas y los efectos de los procesos humanos sobre ellos (NRC, 2014).

Recientemente se publicaron algunos trabajos en los cuales se simula el CCUS que ocurrió durante periodos del pasado mucho más remotos, que llamaremos en el resto del este documento ”modelos

de CCUS históricos”, en oposición a los modelos de simulación de periodos recientes que llamaremos ”modelos contemporáneos”. Algunos de los trabajos se enfocan en estimar tasas de deforestación y emisiones de gases de efecto invernadero (Pongratz *et al.*, 2008; Kaplan *et al.*, 2009; Lemmen, 2010; Kaplan *et al.*, 2012), otros modelan la distribución espacial de los tipos de cubierta y uso del suelo a través del tiempo (Paegelow y Camacho Olmedo, 2008a; Yu *et al.*, 2012). Finalmente un grupo de modelos se enfoca en las actividades de aprovechamiento (Parker *et al.*, 2001; Axtell *et al.*, 2002; Griffin y Stanish, 2007; Macmillan y Huang, 2008).

El objetivo de este artículo es hacer una revisión de los modelos de cambio de cobertura y uso del suelo históricos para compararlos con los modelos contemporáneos, con la premisa de que la amplia experiencia adquirida en el desarrollo de modelos para simulaciones prospectivas pueda beneficiar el desarrollo de modelos cuyo fin es simular cambios que ocurrieron en el pasado.

La revisión está dividida en tres secciones: La primera explica el funcionamiento de los modelos de cambio contemporáneos. La siguiente sección es un análisis de los modelos de CCUS históricos. Finalmente en la tercera sección, se comparan los dos tipos de modelo y se discuten los aportes de los modelos contemporáneos a los estudios históricos.

1.2. Modelos contemporáneos

En las últimas décadas, una gran variedad de modelos fueron desarrollados para analizar y simular los CCUS en el futuro, proyectar escenarios alternativos de cambios, conducir experimentos para ayudar en la comprensión de los cambios, y apoyar el diseño de manejo del territorio (Veldkamp y Verburg, 2004; Mas *et al.*, 2014).

El National Research Council -NRC (2014) propone una clasificación de los enfoques de modelación fundada con bases teóricas y empíricas, los métodos utilizados y el tipo de aplicación. Esta clasificación propone cinco categorías ordenadas desde los modelos basados en patrones hasta los modelos basados en agentes, estos últimos interesados mayormente en explicar los procesos que llevaron al cambio. Una sexta categoría concierne a los enfoques híbridos (Tabla 1). El enmarcar a los modelos de CCUS en enfoques conceptuales permite entender mucho sus ventajas y limitaciones y optimizar su uso como herramienta para realizar proyecciones y explicar procesos de cambio.

Los enfoques de patrones están basados en los datos sobre patrones de CCUS, y tienden a utilizar mapas de cobertura del suelo obtenida a partir de imágenes de satélite, mapas de variables describiendo el medio-ambiente y censos. Establecen generalmente las relaciones entre cambios y rasgos del paisaje basadas en un análisis de los cambios observados en el pasado para realizar simulaciones en el futuro. Los enfoques basados en procesos, tales como modelos económicos, modelos espacialmente desagregados, y

modelos basados en agentes, se usan más en las ciencias sociales, y se enfocan en modelar los mecanismos del cambio.

Para explicar mejor estos diferentes enfoques, describiremos brevemente dos modelos situados en los extremos de este gradiente 1) un modelo basado en patrones (Khoi y Murayama, 2010) y 2) otro basado en agentes (Castella *et al.*, 2005), ambos modelos tienen por objetivo simular los procesos de deforestación en dos regiones distintas pero muy cercanas situadas al norte de Hanoi, Vietnam. En el primer caso, Khoi y Murayama (2010) clasifican imágenes de satélite para elaborar mapas de cubierta forestal para 1993, 2000 y 2007 que permiten crear mapas de áreas deforestadas y calcular las tasas de cambio (a través de la elaboración de una matriz de Markov) para los periodos 1993-2000 y 2000-2007. Por otro lado, elaboran una base de datos en un sistema de información geográfica con mapas de factores reconocidos como conductores de la deforestación (elevación, pendiente, distancia a carreteras y distancia a asentamientos humanos). Entrenan una red neuronal que permite establecer una función que relaciona la distribución espacial de los conductores de la deforestación y las áreas deforestadas, lo cual permite elaborar un mapa de propensión a la deforestación en la cual por ejemplo las áreas más accesibles (cercanas a carreteras y a asentamientos humanos) o con pendientes moderadas presentan una alta propensión a la deforestación. El modelo simula la deforestación calculando la cantidad de cambio esperada durante el periodo de simulación con base en las tasas de cambio observadas en el periodo anterior y simulando la transformación de las áreas forestales más propensas a la deforestación en áreas no forestales. En un primer paso, entrenan el modelo utilizando el mapa de cambio de 1993-2000 para crear un mapa prospectivo para el 2007. Evalúan el desempeño del modelo con base en la comparación entre el mapa simulado y el mapa observado de 2007. Después esta evaluación, utilizan las observaciones del periodo 2000-2007 para simular los cambios a los años 2014 y 2021. El modelo se basa por lo tanto totalmente en un análisis estadístico de los patrones de cambio pasados, permitiendo relacionar la propensión de cambio tomando en cuenta las condiciones medio-ambientales (p. ej. topografía, accesibilidad, idoneidad para actividades agrícolas).

En el caso del modelo de agentes, (Castella *et al.*, 2005) organizan talleres en los cuales se invita a campesinos a participar en juegos de rol, en el cual el jugador tiene que manejar el paisaje para sustentar familias virtuales. Las decisiones de los jugadores se discuten con ellos durante el juego y entrevistas posteriores, permitiendo definir diferentes estrategias de manejo. Una simulación computarizada es elaborada y presentada al final del taller para discusión. El taller se lleva a cabo en localidades que representan la diversidad socio-ambiental de la región de estudio. Un modelo, acoplado con un SIG, simula las decisiones de los actores (por ejemplo intensificar el cultivo del arroz en las tierras bajas o establecer nuevas áreas de cultivo en las pendientes) tomando en cuenta sus características (tamaño de la familia, número de animales, tierras propias, etc.) y el contexto (rendimientos, precios del mercado,

Tabla 1-1: Enfoques de modelación. Modificado de NRC (2014)

Enfoques de modelos	Descripción
1. Enfoque de patrones (Aprendizaje automático)	Generalmente automatizados, los programas reconocen los patrones de cambio y los reproducen. Con base en métodos estadísticos rigurosos, utilizando las observaciones de los cambios para establecer las relaciones espaciales y temporales entre cambio y drivers.
2. Celular	Integra mapas de idoneidad para cubierta y uso del suelo, tomando en cuenta el efecto de vecindad e información de la cantidad de cambio.
3. Económico espacialmente desagregado	Calcula de forma estructural y reducida los modelos econométricos para identificar las relaciones causales que influyen en el equilibrio espacial del territorio.
4. Sector-Basados en modelos económicos	Utiliza modelos de equilibrio estructural parcial o general, para representar oferta y demanda de tierra por sectores económicos, dentro de las regiones sobre la base general de la actividad económica y comercial.
5. Basado en agentes	Simula las decisiones y acciones heterogéneas de los actores del cambio que interactúan en la superficie de la tierra y que conllevan al CCUS.
6. Enfoque híbrido	abarca aplicaciones que combinan diferentes enfoques en un solo modelo o marco de modelado.

programas gubernamentales, accesibilidad, etc.). El modelo simula espacialmente los CCUS relacionado con estas decisiones para el periodo 1990-2001. La evaluación del modelo se basó en 1) la coherencia de la cantidad de cambio simulado y obtenido a partir de mapas de cubierta/uso del suelo de 1995, 1998 y 2001, 2) la coherencia de métricas del paisaje a nivel de poblado y de distrito y 3) una validación “social” que consistió en detectar discrepancias entre las reglas del modelo y la opinión de líderes locales recopilada durante talleres de validación.

El modelo de Khoi y Murayama (2010) es por lo tanto un modelo basado en los datos, en el cual los procesos de cambio no son utilizados de forma explícita sino a través de un análisis enfocado en los patrones de cambio. Al contrario, el modelo de Castilla *et al.* (2005) se basa en conocimiento experto, recabado a través los talleres y las entrevistas, y se enfoca en modelar la toma de decisión de los actores del cambio. En los siguientes párrafos se describen brevemente los insumos, métodos de entrenamiento, simulación y validación comúnmente utilizados en los modelos contemporáneos.

1.2.1. Insumos

Los insumos de los modelos orientados a patrones son comúnmente mapas de Cobertura/Usos de suelo de diferentes fechas, que frecuentemente provienen de datos de sensores remotos describiendo los factores potenciales de CCUS (Mas *et al.*, 2014).

Los insumos de los modelos orientados a patrones son comúnmente mapas de uso/cubierta del suelo para varias fechas, muchas veces obtenidos a partir de datos de percepción remota, y mapas describiendo factores potenciales de estos cambios. Típicamente, son factores determinando la idoneidad del terreno para llevar a cabo ciertas actividades humanas (elevación, pendiente, tipo de suelo), accesibilidad (distancia a vías de comunicación, a asentamientos humanos), características de la población (densidad, actividades, marginación social, etc.), áreas donde se aplican ciertas políticas (ANP, programas de fomento agrícola . . .) (Soares-Filho *et al.*, 2002; Verburg *et al.*, 2003; Pérez-Vega *et al.*, 2012). Los modelos orientados a agentes usan generalmente información sobre las tomas de decisión que conducen a los cambios obtenida a través de entrevistas con los actores claves de estos cambios. Se pueden apoyar también con cartografía y datos de censos.

1.2.2. Entrenamiento o calibración del modelo

El entrenamiento, o calibración, del modelo consiste en determinar los parámetros que controlan el comportamiento del mismo. Los modelos orientados a patrones, basados en las tendencias observadas en el pasado obtienen generalmente esta información a través de la comparación de dos mapas de CUS de fechas pasadas (Mas *et al.*, 2014). Esta comparación permite estimar las tasas de cambio anual durante este periodo, muchas veces a través de una matriz de Markov. Esta matriz expresa la proporción de una determinada cobertura que se transformará en otro tipo de cubierta bajo el supuesto que las tendencias observadas sigan siendo las mismas (proceso estacionario) y permite realizar proyecciones en el futuro (Takada *et al.*, 2009). Por otro lado, un análisis estadístico permite relacionar los factores de cambio (por ejemplo pendiente o accesibilidad) con los cambios observados. Esta relación se establece a través de diferentes métodos como modelos de regresión, pesos de evidencia (Soares-Filho *et al.*, 2013), métodos de inteligencia artificial (Sangermano *et al.*, 2010), etc. El resultado es un mapa con valores que indica la propensidad de cambio. Existen numerosas variaciones: la cantidad de cambio puede ser calculada por un modelo externo (Soares-Filho *et al.*, 2001) y el mapa de cambio potencial puede ser obtenido a través de métodos que permiten la incorporación de conocimiento experto para salir de una modelación que reproduce estrictamente los patrones de cambio observados en el periodo pasado (Overmars *et al.*, 2007; Cuevas y Mas, 2008).

En los modelos orientados a agentes, la calibración del modelo consiste en determinar las reglas de comportamiento de los agentes. Se determina generalmente a través de encuestas que permite conocer los criterios utilizados por los actores del cambio al tomar una decisión que afecte los usos y cubiertas del suelo (Castella *et al.*, 2005).

1.2.3. Simulación

En los modelos orientados a patrones, la simulación consiste en modificar el mapa de entrada para reflejar los cambios de CUS. El modelo calcula la cantidad de cambio esperada para el paso de tiempo simulado, y efectúa los cambios en las áreas que presenta el potencial de cambio más alto. Algunos modelos utilizan celulares autómatas, para reproducir los patrones espaciales de estos cambios, controlando la forma y el tamaño de los parches de cambio simulados (Soares-Filho *et al.*, 2001). Debido a que los modelos orientados a agentes se focalizan en simular los procesos de cambio algunos se implementan en un paisaje virtual. Sin embargo, estos modelos tienden a acoplarse con sistema de información geográfica que contienen las bases de datos sobre los paisajes reales para simular patrones de cambio más realistas (Castella *et al.*, 2005).

1.2.4. Evaluación del modelo

La evaluación de los modelos orientados a patrones de cambio se basa generalmente en la evaluación de la coincidencia espacial entre un mapa real (observado) y el mapa simulado. Para ello se usan generalmente mapas de CUS de por lo menos tres fechas, se calibran el modelo con las dos primeras, para obtener un mapa simulado para la tercera. La evaluación del modelo consiste en estimar el grado de similitud entre el mapa simulado y el mapa real. Debido a que la mayor parte del paisaje no presenta cambios, esta similitud puede ser muy alta aun para modelos muy mediocres (Paegelow *et al.*, 2003) por lo cual se recomienda enfocar la evaluación en los cambios (cambios reales versus cambios simulados). La evaluación se centra generalmente en evaluar la coincidencia espacial entre los cambios simulados y reales a través del cálculo de diferentes índices como el índice de Kappa (Pontius, 2000) índice de coincidencia fuzzy (Hagen-Zanker, 2009) y coincidencia en diferentes resoluciones (Verburg *et al.*, 2003; Castella y Verburg, 2007) que permiten manejar una cierta tolerancia en cuanto a la coincidencia. Algunos autores proponen el uso de otros índices, por ejemplo índices de fragmentación del paisaje (Mas *et al.*, 2012). La evaluación puede enfocarse en los mapas de propensidad de cambio utilizando el análisis ROC (Característica Operativa del Receptor) o la diferencia de potencial de cambio (Pérez-Vega *et al.*, 2012). Los modelos orientados a agentes que tienen como salida mapas de CUS prospectivos pueden evaluarse con los mismos métodos que los mapas resultantes de modelos orientados a procesos. Sin embargo, ya que diferentes procesos pueden llevar a paisajes similares y que el objeto principal de este enfoque es la modelación de los procesos de cambio, la evaluación se enfoca en las reglas de toma de decisiones de los agentes (Castella *et al.*, 2005). Vale la pena mencionar que los modelos prospectivos a menudo exhiben poco poder predictivo (Pontius *et al.*, 2008), debido que los procesos de CCUS no son estacionarios

y al hecho de que los factores de cambio utilizados en el modelo no controlan los patrones de cambio estrictamente.

1.3. Modelos de CCUS históricos

Hayashida (2005) identifica tres principales motivos para la modelación de CCUS históricos se debe a, (1) un creciente interés por los procesos de configuración de los paisajes históricos; (2) el reconocimiento de que los seres humanos son parte de la historia del paisaje; y (3) la aparición de la ecología de la restauración cuyo objetivo es recuperar los ecosistemas degradados utilizando condiciones de referencias históricas. Otros autores se enfocan en los cambios en las propiedades de la superficie terrestre relacionados con el CCUS y que afectan el clima mediante la modulación de los intercambios de energía y gases con la atmósfera. Estos autores reportan que las emisiones de dióxido carbono y metano por actividad humana en escalas de tiempo de cientos de años tienen alta repercusión sobre problemas actuales como el cambio climático (Houghton., 1999; Li *et al.*, 2009). De acuerdo a la revisión realizada por Williams (2000) desde un enfoque histórico la deforestación es el transformador de cobertura más importante, debido a la extensión de superficie geográfica que ha modificado por miles de años. Investigaciones recientes muestran que los habitantes en Europa del periodo Neolítico, o edad de piedra hace (4500-4000 años A.C.), y las primeras civilizaciones de Norte América y otras partes del mundo, conformadas como sociedades sedentarias y económicamente diversificada, tuvieron un impacto importante en la vegetación nativa. Se estima que la extensión mundial del bosque preagrícola era de 61.51 millones de km^2 de los cuales se perdieron 15.51 millones de km^2 antes de circa 1500 A.C. Los modelos de CCUS históricos son relativamente pocos y se han desarrollado mayormente en las últimas dos décadas en varias partes del mundo principalmente China, Estados Unidos, Europa y América del sur (Figura. 1). Los modelos históricos tienen distintos orígenes disciplinarios y emplean diversas escalas espacio-temporal. Como se puede observar en la Figura 2, algunos estudios se enfocan en áreas de estudio del orden de cientos de km^2 mientras otros tienen escalas continental y global, de la misma forma algunos estudios abarcan periodos desde cientos de años hasta decenas de miles de años.

Identificamos tres grandes grupos de modelos de acuerdo al tipo de modelación. El primer grupo orientado a patrones, tiene como objetivo evaluar las afectaciones en la atmósfera debido al CCUS y su posible efecto en el cambio climático y calentamiento global. Estos modelos consisten en la elaboración de una serie de mapas a escala regional o global que representan patrones de emisiones de gases de efecto invernadero. Las estimaciones de las emisiones de gases se basan en mapas de densidad poblacional y mapas de vegetación que permiten evaluar la cantidad probable de deforestación y de gases emitidos

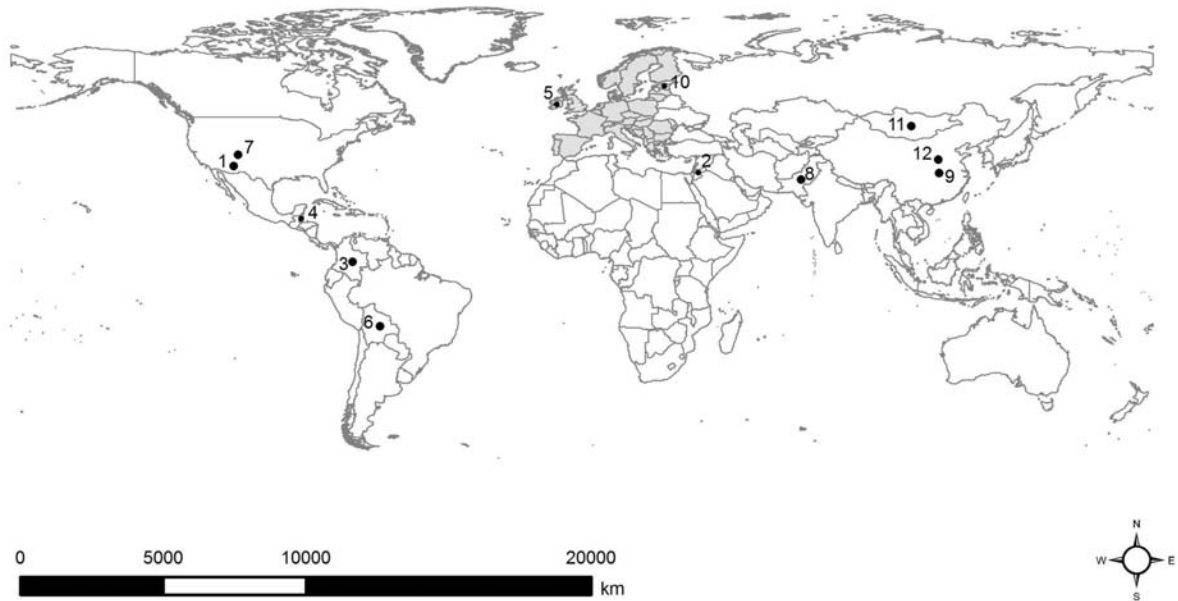


Figura 1-1: Distribucion espacial de los modelos de CCUS revisados. Referencias: 1. Axtell *et al.* (2002); 2. Barton *et al.* (2010); 3. Etter *et al.* (2008); 4. Fedick (1995); 5. Gaillard *et al.* (2008); 6. Griffin y Stanish (2007); 7. Kohler *et al.* (2012b); 8. Lemmen (2010); 9. Li *et al.* (2009); 10. Poska *et al.* (2008); 11. Rogers *et al.* (2012); 12. Yu *et al.* (2012). Williams (2000) incluye en su estudio todo Europa (mostrado como área sombreada en el mapa).

(Houghton., 1999; Goldewijk, 2001; Goldewijk y Ramankutty, 2004; Foley *et al.*, 2005; Boyle *et al.*, 2011; Hurtt *et al.*, 2011).

El segundo grupo de modelos, basados en agentes, contiene un menor número de contribuciones, las cuales tratan de entender los procesos socio-ambientales y su relación con el CCUS (Kohler *et al.*, 2005; Griffin y Stanish, 2007; Macmillan y Huang, 2008; Kohler *et al.*, 2012b; Murphy, 2012). En términos generales, el área de estudio es pequeña desde un par de kilómetros cuadrados hasta unos cientos. En su mayoría, estos modelos utilizan insumos arqueológicos y el objetivo es reconstruir el comportamiento de las civilizaciones pasadas o encontrar explicación a la desaparición repentina de éstas (“Colapso”) (Turner y Sabloff, 2012).

Finalmente, un tercer grupo de contribuciones, se basan en una modelación híbrida, que permiten obtener patrones de cambio, tomando en cuenta variables sociales y biofísicas, utilizando registros históricos, arqueológicos, paleoecológicos o arqueofauna entre otros. La modelación se enfoca en los patrones de cambio del paisaje con un especial énfasis en simular de forma realista la distribución espacial de los elementos del paisaje (Etter *et al.*, 2008; Peeters, 2010; Yu *et al.*, 2012). En algunos casos estos modelos simulan la interacción entre los procesos de cambio y procesos de degradación como la erosión (Barton

et al., 2012). Algunas similitudes se hicieron evidentes en los modelos de cada grupo (Fig. 2), los trabajos dedicados a hacer estimaciones de gases de efecto invernadero tienen escalas mayormente pequeñas, ya que tales estimaciones no requieren tanto detalle y son más útiles si brindan información a nivel mundial o como insumo para modelos climáticos. Los recortes temporales de estos modelos dependen de la base de datos de referencia para CCUS que utilizan, y abarcan generalmente periodos de cientos o miles de años (Ej. 6000 años A.P.).

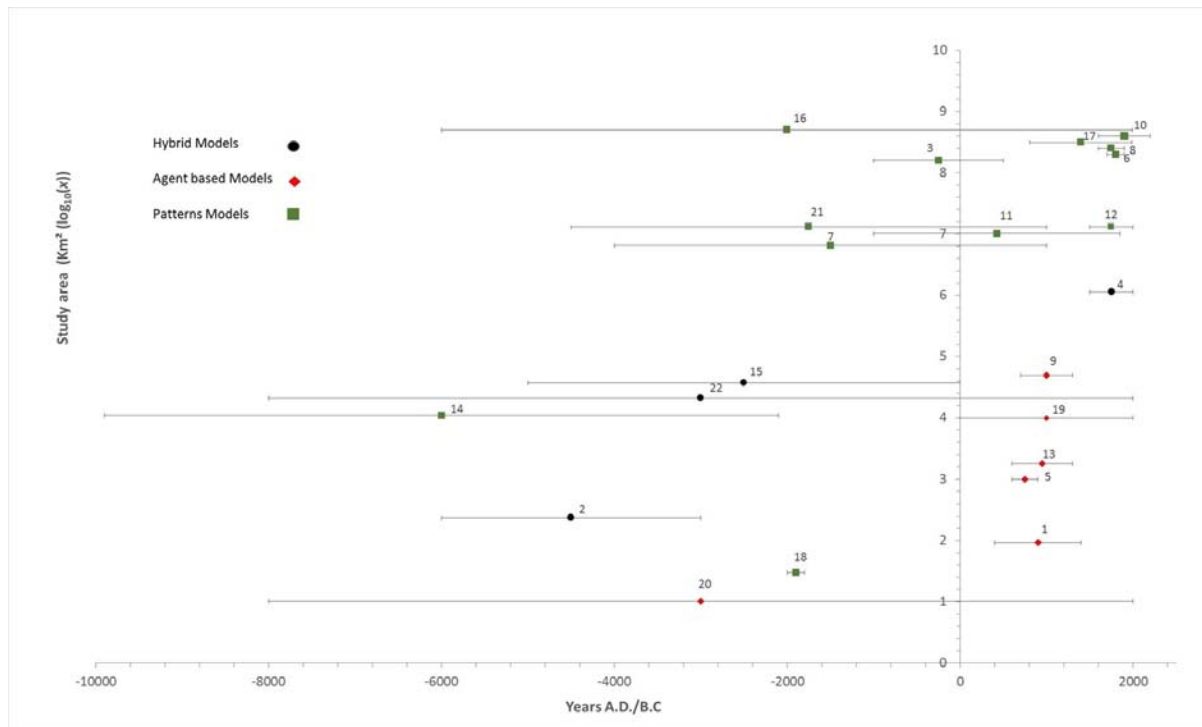


Figura 1-2: Escala espacial y temporal de la revisión de los modelos de CCUS históricos revisados. Los tres grupos de modelos tienden a asociarse con diferentes escalas. Referencias: 1. Axtell *et al.* (2002); 2. Barton *et al.* (2010); 3. Boyle *et al.* (2011); 4. Etter *et al.* (2008); 5. Fedick (2012); 6. Goldewijk (2001); 7. Gaillard *et al.* (2010); 8. Goldewijk y Ramankutty (2004); 9. Griffin y Stanish (2007); 10. Hurtt *et al.* (2011); 11. Kaplan *et al.* (2009); 12. Kaplan *et al.* (2012); 13. Kohler *et al.* (2012b); 14. Lemmen (2010); 15. Li *et al.* (2009); 16. Olofsson y Hickler (2008); 17. Pongratz *et al.* (2008); 18. Poska *et al.* (2007); 19. Rogers *et al.* (2012); 20. Ruddiman y Ellis (2009b); 21. Williams (2000); 22. Yu *et al.* (2012)

En comparación los modelos basados en agentes, se ven limitados a utilizar escalas grandes ya que simulan el comportamiento de individuos o de un conjunto de individuos. Debido a la complejidad del sistema que se desea modelar (procesos sociales), estos modelos se enfocan en periodos de modelación cortos predominantemente. La mayoría se centra en modelar cambios de las primeras civilizaciones en regiones con registros arqueológicos suficientes para permitir la elaboración del modelo.

Los modelos híbridos son pocos, pueden ser muy flexibles respecto a la escala espacial y temporal ya que representan un compromiso entre modelos enfocados a patrones y a procesos.

1.3.1. Objetivos

Encontramos diversos objetivos en los modelos de CCUS históricos como; estimar emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por el desarrollo de áreas agrícolas (Pongratz *et al.*, 2008; Lemmen, 2010), conocer potenciales de producción agrícola en tiempos prehistóricos (Axtell *et al.*, 2002) y/o representar procesos socioeconómicos al inicio de la agricultura, analizar la relación entre el manejo y procesos de erosión y deposición (Barton *et al.*, 2012), reconstruir actividades humanas, como el sedentarismo, el pastoreo y la caza-recolección en pequeña o mayor escala (Kohler *et al.*, 2012b; Murphy, 2012; Rogers *et al.*, 2012), modelar el inicio de la vida sedentaria y las primeras urbes y su impacto en el ambiente (Macmillan and Huang, 2008).

1.3.2. Insumos

En cuanto a los insumos, los modelos históricos disponen de una información escasa comparada con los modelos contemporáneos, obligando a los modeladores a indagar en diferentes disciplinas como la arqueología, paleoecología, palinología, paleontología, historia, y antropología para obtenerlos. Por ejemplo, la palinología puede servir para evaluar áreas de cultivo analizando el polen fósil encontrados en el registro polínico (Poska *et al.*, 2007), y el registro paleoecológico/paleoambiental permite indagar los animales que fueron domesticados y las zonas de ocupación (Axtell *et al.*, 2002).

Por consecuencia, los trabajos de modelación histórica son mayormente interdisciplinarios. La obtención de la mayor cantidad de registros del pasado permite establecer patrones de asentamiento, posibles usos y costumbres, y así obtener las probables áreas de cambio. El registro arqueológico por lo general es el insumo principal permitiendo generar las reglas y/o normas que definen los procesos y patrones de consumo agrícola de la población, la interacción entre ellos, y con el medio físico (Axtell *et al.*, 2002; Macmillan y Huang, 2008; Yu *et al.*, 2012). La arqueología también puede proveer información de gestión de agua del pasado y algunas normas sociales (Murphy, 2012). El uso del registro histórico es otro posible insumo, la literatura histórica cuentan con información fiable de lo acontecido, si bien no permite remontar mucho tiempo atrás (Etter *et al.*, 2008). Algunos estudios incluyen las características de la dinámica poblacional como la presión demográfica, competencia por los recursos y capacidad de carga obtenidos de registros históricos (Patterson *et al.*, 2010).

Debido a que los procesos geológicos requieren miles de años para cambiar drásticamente, es posible usar información geológica y topográfica actual (Haug *et al.*, 2003). Otros productos actuales que se han usado son imágenes de satélite, ortofotos, mapas de suelos y/o sedimentos no consolidados, y mapas de geoformas (Gaillard *et al.*, 2010; Lemmen, 2010). En ocasiones se puede usar el mapa de cubierta vegetal actual, esta opción es factible en aquellos estudios que tienen temporalidades próximas al presente (par

de cientos de años), y en los que el registro polínico no indique asociaciones vegetales distintas a las actuales, esto hace posible el uso de algunos mapas de vegetación actuales (Axtell *et al.*, 2002; Bray *et al.*, 2004b; Barton *et al.*, 2012).

Existen también conjuntos de base de datos de CCUS obtenidas a través de modelación que ya contienen información acerca de los CUS del pasado y que es posible ingresar a los modelos de simulación (Goldewijk y Ramankutty, 2004; Hurtt *et al.*, 2006; Pongratz *et al.*, 2008). La primera base de datos es la “Base de datos de la Historia ambiental mundial” (History Database of the Global Environment (HYDE)) (Goldewijk, 2001), que abarca los pasados 300 años (Olofsson y Hickler, 2008; Kaplan *et al.*, 2009, 2012). HYDE fue desarrollada para probar y validar un modelo mundial de medio ambiente con bases de datos sobre la estimación de la población histórica y la distribución de las tierras agrícolas. Los datos poblacionales fueron obtenidos del Atlas histórico de la Población Mundial (Atlas of World Population History)(McEvedy y Jones, 1978). Los datos en HYDE son presentados en una resolución de 5 minutos e incluyen 14 tipos de vegetación. La base de datos divide al mundo en 19 grupos, con varias subregiones en cada grupo (Goldewijk, 2001).

Una segunda base de datos encontrada es “Cambio de cobertura de suelo antropogénico” (Anthropogenic Land Cover Change(ALCC)) cubre el periodo de tiempo de 800-1992 D.C., acompañado por un conjunto con mapas de alta resolución del centro de “Sustentabilidad y ambiente global”(Sustainability And the Global Environment (SAGE)) (Pongratz *et al.*, 2008). construida por Pongratz y colaboradores (2008). De acuerdo a Pongratz et.al. (2008) es una herramienta de estudios de cambio global con énfasis en estimaciones de gases de efecto invernadero (GEI), también incluye estimaciones demográficas y de la cubierta vegetal. Esta base combina información satelital y algoritmos específicos que producen mapas mundiales multitemporales para los últimos 300 años (Lemmen, 2010; Hurtt *et al.*, 2011).

Finalmente, un grupo que hace investigación sobre relaciones Suelo-Vegetación-atmósfera, generaron una base de datos a través de un modelo que simula el cambio del suelo prehistórico y el preindustrial (Kaplan *et al.*, 2009). La base de datos contiene mapas de agricultura y pastoreo, clima y propiedades del suelo a escala continental (Europa) y cubre el periodo de 1000 BC - AD 1850 años).

Otros modelos de CCUS en ocasiones usan como insumo salidas de otros modelos que explican el comportamiento de las poblaciones. Por ejemplo Patterson *et al.* (2010) usa el modelo de (Aoki *et al.*, 1996), que simula las interacciones entre poblaciones cazadores-recolectores y agricultores, en el Neolítico.

1.3.3. Entrenamiento/simulación

Los modeladores de cambio de cobertura y uso del suelo del pasado utilizan diversas metodologías. Los modelos enfocados a las estimaciones de áreas agrícolas a escala global relacionan la densidad poblacional y el uso del suelo esperado de las actividades de ésta población. En el caso de ALCC y HYDE, la

estimación entre la densidad de población y área agrícola es lineal entre la población y la superficie del área cultivada. Sin embargo Kaplan *et al.* (2009), utilizan una relación no lineal, adoptan parámetros de desarrollo e intensificación tecnológica (Revolución industrial), consideran extracción de madera y toman en cuenta el barbecho y la agricultura migratoria. A pesar de que los tres conjuntos de datos utilizan las mismas estimaciones de la población como un proxy, se puede exhibir diferencias en los resultados de la reconstrucción debido a diferencias en la metodología de los modelos. (Yan *et al.*, 2013), siendo un punto de incertidumbre que las reconstrucciones constituyen y por lo tanto un problema que debe ser abordado.

Estos modelos sirven de insumo para modelos que estiman las emisiones y secuestro de gases de efecto invernadero en la atmósfera (DeFries *et al.*, 1999; Ruddiman, 2003; Gaillard *et al.*, 2008; Ruddiman y Ellis, 2009b; Kaplan *et al.*, 2012). Algunos modelos simulan los flujos de carbono entre vegetación natural, cultivos, suelo y atmósfera tomando en cuenta los cambios de cobertura del suelo y series de tiempo, de temperatura, precipitación y concentración de CO² en la atmósfera (Williams, 2000; Olofsson y Hickler, 2008; Peeters, 2010; Kaplan *et al.*, 2012). Utilizan datos actuales: Por ejemplo, Kaplan *et al.* (2012) utilizan el mapa de suelos Harmonized World Soil Database y Olofsson y Kickler (2008) emplean índices de vegetación obtenidos de imágenes de satélite para estimar la producción primaria neta de diferentes tipos de vegetación.

Las simulaciones enfocadas a patrones de CCUS históricos utilizan métodos estadísticos para hacer más robustas las simulaciones, por ejemplo las cadenas de Kolmogorov y otros prueba de ajuste de bondad para calibrar los mapas de entrada (Barton *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2012; Etter, 2013). Por ejemplo, Yu *et al.* (2012) modelan la distribución de la agricultura en el valle Yiluo en el norte de China utilizando tres submodelos: 1. "Necesidades de cambio de uso del suelo" que estima el área total necesaria de campos de cultivos para abastecer a la población humana en la región en las diferentes fechas modeladas. 2. "Submodelo de área residencial" que genera un mapa de la distribución potencial humana con base en el análisis de la distribución de los sitios arqueológicos con respecto a variables ambientales a través del ajuste de bondad de Kolmogorov y, 3. "Submodelo de asignación de cambio de uso de suelo" que distribuye la superficie agrícola determinada por el submodelo 1 en las inmediaciones de los sitios arqueológicos tomando en cuenta el mapa de distribución potencial del submodelo 2. Estas simulaciones se realizan para diferentes fechas cada 1000 años desde 8000 A.P. hasta el presente tomando en cuenta la antigüedad de los sitios arqueológicos y las estimaciones de población (Yu *et al.*, 2012). Camacho *et al.* (2008) adoptan un enfoque retrospectivo para elaborar mapas de distribución de agricultura de riego y de temporal en 1572, 1752 y 1855/61 con base en un mapa de uso del suelo de 1957 y datos catastrales de superficie de agricultura de riego y temporal. Para ello elaboran mapas de idoneidad utilizando un análisis multicriterio basado en criterios invariable en el tiempo como la pendiente, elevación, distancia

a canales de irrigación y a poblaciones. Cada criterio es ponderado con base en los resultados de un análisis de coincidencia de los criterios y de los usos en el mapa de 1957. La coincidencia se evaluó a través del coeficiente de relación de Pearson y V de Cramer.

Los modelos basados en agentes se enfocan principalmente en los procesos de CCUS. Modelan la interacción entre los agentes y el paisaje (CCUS) y la interacción entre agentes como por ejemplo, reproducción e intercambio comercial. Si el modelo es explícitamente espacial es posible mapear los cambios de índole ambiental. La información obtenida es mayormente cualitativa, sin embargo es posible generar datos estadísticos descriptivos (Dean *et al.*, 2000; Kohler *et al.*, 2005; Griffin y Stanish, 2007; Kohler *et al.*, 2012a). Por ejemplo el modelo de agentes de Axtell y colaboradores (2002), recrea el crecimiento demográfico y la caída de un pueblo de la civilización “Anasazi” en Long House Valley, durante el periodo 800 D.C. - 1300 D.C a través de reglas sobre toma de decisiones multiagentes. El modelo simula actividades durante el ciclo de vida de hogares virtuales (agentes), como actividades productivas, consumo e interacciones sociales como matrimonio e intercambio comercial. El funcionamiento del modelo se basa en reglas y parámetros, las reglas rigen la creación y ubicación de nuevos hogares: por ejemplo un nuevo hogar se crea cuando la hija alcanza los 15 años y su ubicación es definida por la aptitud agrícola del terreno como la proximidad a cuerpos de agua. Algunos parámetros utilizados son la necesidad nutricional por individuo y la esperanza de vida. Estas reglas y parámetros fueron obtenidos a través de los registros arqueológicos y paleoambientales. El modelo toma en cuenta la variabilidad climática observada en los registros dendroclimáticos, palinológicos, geomorfológicos y arqueológicos. Finalmente, el modelo simula la evolución del paisaje (patrón de distribución de los asentamientos y áreas agrícolas).

En cuanto a los modelos híbridos, contienen información tanto cualitativa como cuantitativa permitiendo mediar entre la modelación de agentes (procesos) y la de patrones. Por ejemplo, el modelo “Landform-Evolution, CYBEROSION”; simula las interacciones entre humanos, animales domésticos y silvestres, vegetación y erosión en comunidades prehistóricas. Permite evaluar la vulnerabilidad del paisaje a procesos antrópicos como por ejemplo el aumento de las tasas de erosión a mayor presión antrópica. Los agentes se utilizan para las interacciones entre procesos básicos como la adquisición de alimentos (Wainwright, 2008). Otro ejemplo de modelo híbrido es el realizado por Poska *et al.* (2008), quienes hacen una modelación de los cambios entre cuatro categorías de cubiertas/uso del suelo con cadenas de Markov y datos de polen fósil entre 600 B.C.- 1940 B.C. Deducen el porcentaje de cobertura correspondiente a ciertas cantidades de polen con base en el análisis de análogos modernos.

1.3.4. Validación

La evaluación de los modelos de simulación espacialmente explícita permite conocer el grado de fiabilidad de los mapas obtenidos y el desempeño del modelo. La validación de los modelos contemporáneos

es principalmente basada en la coincidencia espacial entre un mapa de la distribución de los elementos del paisaje real y el mapa simulado. Obviamente este enfoque no es posible para simulaciones del pasado debido a que no se cuenta con información detallada sobre esta distribución. Tal vez por esta razón los modelos de simulación histórica de CCUS, por lo general, no se someten a pruebas de validación.

Algunas formas de evaluar los modelos del pasado se enfocaron en comparar la distribución de los sitios arqueológicos reales con la ocupación predicha (Dean *et al.*, 2000; Axtell *et al.*, 2002). Para ello, se modelan sitios de ocupación usando como insumo una parte de la localización de los sitios arqueológicos y el resto se compara con los puntos predichos con el modelo, permitiendo evaluar si el modelo subestima o sobreestima la cantidad de sitios (Kohler *et al.*, 2012a). En estos casos no se evalúa el patrón de cambio. Otra posibilidad es comparar áreas de cambio en relación a las actuales (Etter *et al.*, 2008). Por ejemplo Yu *et al.* (2012), modela la expansión de áreas agrícolas desde 8000 B.P. hasta la actualidad y mide la coincidencia entre el último mapa simulado y un mapa actual, a través del índice de Kappa. Poska *et al.* (2008), comparan proporciones de cobertura derivados de datos de polen fósil, mapas históricos y mapas simulados.

En el caso de los modelos donde se estiman los gases de efecto invernadero también es común llevar la simulación hasta la actualidad, y generar escenarios donde haya perturbación antrópica o no. Este tipo de validación solo se puede aplicar a los modelos que diferencian ciclos naturales y acción humana (Ruddiman y Ellis, 2009b).

En la evaluación de los modelos es importante tomar en cuenta la calidad de la información obtenida del modelo y debe estar centrado en el objetivo del modelo. Por ejemplo, si el modelo tiene como objetivo reconstruir un paisaje, la coincidencia espacial entre los elementos simulados y reales es importante. Sin embargo, si el modelo tiene como objetivo evaluar la transformación del paisaje o la emisión de GEI, la evaluación de la simulación de las diferentes cubiertas es suficiente. Idealmente, los datos usados para el modelo deben ser calibrados y evaluados de forma independiente.

1.4. Discusión

Los objetivos de los modelos contemporáneos son, mejorar la comprensión de las interacciones entre el cambio y diversos procesos, ambientales y/o sociales, realizar proyecciones bajo diferentes escenarios y proporcionar apoyo en la toma de decisiones. De la misma forma, los modelos de CCUS históricos ayudan a entender la configuración de los paisajes históricos y probar diferentes hipótesis sobre los cambios pasados. De forma muy concreta ayudan a la recuperación de los ecosistemas degradados utilizando condiciones de referencias históricas (Hayashida, 2005; NRC, 2014). Por lo tanto ambos tipos de modelos tienen como fin encontrar sistemas de uso del suelo de mayor sustentabilidad.

Para los modelos contemporáneos existe una amplia gama de enfoques, métodos y software. Como lo muestra nuestra revisión los modelos del pasado son pocos en comparación con los contemporáneos, sin embargo, presentan gran diversidad de enfoques y métodos. Esta diversidad puede resultar confusa para escoger el enfoque y el método adecuado para los fines y de acuerdo a los insumos disponibles. En el caso de los modelos contemporáneos existen revisiones y evaluaciones metodológicas que dan pautas para escoger los modelos (Pérez-Vega *et al.*, 2012; Mas *et al.*, 2014; NRC, 2014). Por ejemplo, los modelos de patrones son más adecuados para la identificación de problemas, ya que, a pesar de carecer de los detalles estructurales sobre el proceso son necesarios para evaluar los efectos del cambio, son fáciles de aplicar y pueden proporcionar valiosas descripciones, proyecciones de patrones y tendencias. Los enfoques basados en agentes, económicos y estructurales proporcionan un medio para explorar las interacciones en el sistema hombre-medio ambiente y para evaluar los efectos de políticas y decisiones sobre uso así como sus posibles efectos (NRC, 2014).

Los modelos contemporáneos pueden hacer distintos aportes a los modelos históricos principalmente metodológicos, sin embargo, se deben considerar ciertas peculiaridades de los insumos disponibles para los modelos del pasado. Los insumos son drásticamente diferentes: mientras los modelos contemporáneos se apoyan la cartografía de uso del suelo completa del área de estudio, datos de censos socioeconómicos y de entrevistas, los insumos para los modelos históricos son limitados. Los modelos históricos tienen insumos principalmente arqueológicos, históricos, antropológicos y paleoambientales. Estos insumos están sujetos a una interpretación que es subjetiva y en ocasiones errónea, como la densidad y distribución poblacional de civilizaciones del pasado (Culbert, 1995; Gutiérrez, 2009).

Debido a su naturaleza, el registro histórico no brinda una información temporal y espacial detallada, por ejemplo el registro polínico no da información temporal precisa debido a que siempre se determina la fecha solo de algunos estratos y las fechas de los demás se infieren por interpolación (Poska *et al.*, 2007, 2008). De la misma forma los datos polínicos permiten estimar proporciones de cubiertas vegetales pero es difícil conocer el área representada y la distribución espacial de las comunidades vegetales. Los datos arqueológicos presentan limitaciones similares, ya las dataciones están sujetos a la disponibilidad de objetos como cerámicas y pigmentos (buscar art arqueológicos dataciones). Además a menudo a través del tiempo se pierde registro ya sea por saqueo, destrucción deliberada de rasgos culturales, erosión o deposición (Barton *et al.*, 2012). Los registros del pasado son generalmente escasos lo cual es aún más importante si se quiere utilizar parte de los insumos para entrenar el modelo y otra parte para evaluarlo (Etter *et al.*, 2008; Kohler *et al.*, 2012b). Otra limitación en la modelización es que los procesos socio-ambientales pueden cambiar en cortos periodos de tiempo (Parker *et al.*, 2001, 2003).

De acuerdo a nuestra revisión la mayoría de los modelos del pasado se enfocan en reconstruir los paisajes pasados en una fecha determinada pero no simulan los procesos de cambio de forma dinámica

en el tiempo. Existe una tendencia de los modelos contemporáneos de CCUS a simular de forma más verosímil los procesos de cambio simulando por ejemplo las sucesiones de vegetación y ciclos agrícolas. Esto permite simular procesos ambientales como erosión del suelo, incendio, deslizamientos, degradación forestal y desertificación. Aplicado a casos del pasado este tipo de modelo permite probar hipótesis sobre las condiciones que pudieran haber propiciado procesos de degradación ambiental. Los modelos de cambio de cobertura y uso del suelo pueden adquirir un comportamiento de sistema complejo, como las interacciones entre dinámicas culturales y cambios climáticos (Fisher *et al.*, 2005; Scheffer, 2009).

1.5. Conclusiones

1. Identificamos tres grandes grupos de modelos históricos: Modelo basado en Patrones, Modelo basado en Agentes y modelos Híbridos.
2. Los modelos históricos de CCUS se podrían beneficiar de la amplia experiencia adquirida en la modelación contemporánea; sin embargo los insumos de los modelos del pasado son drásticamente diferentes y limitantes. Debido a la escasez y a las características de los insumos, los modelos históricos difícilmente pueden basarse en un enfoque totalmente basado en los datos (data driver) sino en un enfoque más basado en conocimiento experto o enfoque híbrido.
3. La mayoría de los modelos del pasado se abocan en reconstruir el paisaje para una cierta fecha más que en simular los CCUS entre fechas. Es decir, los modelos históricos no son dinámicos en el tiempo. Recientemente, se está orientando la simulación a hacia modelos más realistas en cuestión de los procesos de cambio, lo cual permite entender mejor problemas como el deterioro ambiental. Es probable que ciertos modelos históricos adopte también esta tendencia.
4. Dependiendo de los objetivos del modelo y entradas disponibles, se elegirá el enfoque apropiado para generar el modelo. Los modelos basados en agentes son preferentemente cuando se desea modelar toma de decisiones; los modelos basado en patrones son sugeridos cuando se quiere reconstruir el paisaje del pasado o simular los patrones de CCUS del pasado.
5. La cantidad y calidad de los insumos, afecta directamente el desempeño del modelo y limita las posibilidades de evaluarlo. Siempre se debe estar consciente de que la modelación es un ejercicio de simplificación de la realidad, y que los resultados deben interpretarse con cautela

Los modelos históricos representan el uso humano y sus prácticas agrícolas espacial y temporalmente, dando una nueva forma de investigación arqueológica, que permiten simular el pasado de las antiguas civilizaciones entrecruzando las variables de un sistema complejo y dinámico, también permiten simular

la interacción de las diferentes prácticas agrícolas. Los modelos ayudan también a reconstruir la historia del ambiente (Historia ambiental y Ecología Histórica), proporcionando información acerca del paisaje (Ecología y geografía), facilitando una referencia espacial a la perspectiva de los estudios históricos. La simulación histórica forma por lo tanto una nueva herramienta que permite analizar de forma espacial procesos históricos para ciencias sociales como ciencias ambientales.

Capítulo 2

MODELACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE UN SISTEMA ROZA-TUMBA-QUEMA

2.1. Introducción

Los procesos de cambio de cubierta/uso de suelo (CCUS) tienen gran auge en las investigaciones de cambios ambientales. Por ejemplo, existen estudios que identifican los efectos de los CCUS en la calidad y cantidad de los recursos disponibles como agua, suelo, aire, vegetación y demás factores bióticos que se encuentran en combinación dentro del paisaje (Lambin *et al.*, 2001; Galicia *et al.*, 2007). Los CCUS están altamente relacionados con la toma de decisiones como la aplicación de políticas o la adopción de nuevas prácticas agrícolas. Si tomamos en cuenta la diversidad de cubierta/uso de suelo (CUS) que los actores pueden ejercer, el monitoreo del CCUS toma especial relevancia.

Los CCUS pueden ser procesados a través de los sistemas de información geográfica que proporcionan información sobre la configuración y composición de los elementos del paisaje basada en observaciones de diversas variables (ej. uso del suelo, cubierta vegetal, valor de la tierra, y gestión del territorio). Los patrones espaciales de los CCUS pueden describirse en forma de mapas, o en medidas cuantitativas derivados de mapas que caracterizan la organización o la configuración de los objetos o los valores del mapa. En contexto de CCUS, esto a menudo implica la caracterización del tamaño, forma, distribución, conectividad y continuidad de la cubierta vegetal o uso del suelo (Laurance y Williamson, 2001; Chan *et al.*, 2006).

Una forma de estimar los cambios en el paisaje y analizarlos, es utilizar los modelos de CCUS, permitiendo explicar-aprender y/o predecir-proyectar el impacto de los procesos de cambio en la superficie de la tierra (Ramankutty y Foley, 1999; Foley *et al.*, 2005). Los modelos de CCUS, se aplican desde el nivel de parcelas individuales dentro de zonas urbanas hasta grandes extensiones de bosques (NRC, 2014). Una de las aplicaciones importantes de estos modelos es comprender las causas y consecuencias de la organización espacial del cambio. Los modelos tratan de explicar los CUS y así poder generar hipótesis de los sistemas sociales y ambientales que pueden tener consecuencias en el CCUS local y/o

global así como sus incidencias en el medio ambiente. Por ejemplo, Durán-Medina *et al.* (2007), a través de modelos de CCUS, muestra que el manejo forestal comunitario, con una adecuada organización social mantiene la cobertura forestal en buen estado de conservación. Los modelos pueden explicar dinámicas de deforestación, evaluar como suceden en un área determinada y dependiendo el caso, predecir y proyectar futuros cambios (Axtell *et al.*, 2002; Soares-Filho *et al.*, 2002; NRC, 2014).

Las dinámicas de deforestación son complejas, un ejemplo de ello es la deforestación debido a la expansión de la agricultura, en donde intervienen factores socio-económicos, ecológicos y biofísicos. Existen diversas prácticas agrícolas. Por ejemplo la agricultura tradicional de Roza-Tumba-Quema (R-T-Q) o agricultura migratoria, usada desde hace más de tres mil años como forma de cultivo es, en la actualidad, comúnmente utilizada en la zona intertropical de nuestro planeta. El sistema R-T-Q es conformado de una serie de pasos: inicia con la selección de un sitio con cubierta forestal, siguen la roza de la vegetación baja, la tumba de los árboles y la quema de los residuos. La quema tiene doble función: además de limpiar el área para el cultivo también propicia la disponibilidad de nutrientes a corto plazo y con ello la producción agrícola. Después de unos tres años, el suelo pierde fertilidad, el control de la maleza se vuelve difícil y la productividad de la parcela disminuye. Para que la parcela recupere su fertilidad, es necesario un periodo de descanso del cultivo (Ochoa-Gaona *et al.*, 2007; Soto Pinto *et al.*, 2011).

Durante este periodo de descanso, que dura generalmente entre 15 y 30 años, la vegetación inicia un proceso de sucesión natural y la cantidad de nutrientes en el suelo incrementa. En México, el sistema R-T-Q se usa para la siembra de maíz, a menudo asociado con otros cultivos como la calabaza o el frijol (milpa). La vegetación secundaria es conocida con los nombres de acahual, huamil, barbecho, hub che', charral o matorral. Los agricultores por lo general tienen suficientes tierras para rotar parcelas en periodos de descanso y de cultivo; cuando unas parcelas están en descanso otras se encuentran en cultivo (Soto Pinto *et al.*, 2011). El tiempo de descanso determina las condiciones de madurez de la vegetación secundaria.

Es importante notar que los acahuales cumplen algunas funciones ecológicas de los bosques. Por ejemplo son reservorios de especies nativas y permiten el paso de algunos organismos (Van der Wal *et al.*, 2006; Soto Pinto *et al.*, 2011; Müller *et al.*, 2014). Ciertos estudios reportan que el sistema R-T-Q, con el adecuado tiempo para los periodos de cultivo y de barbecho, puede ser sustentable (Ferguson y Griffith, 2004; Ochoa-Gaona *et al.*, 2007).

Sin embargo, en algunos casos la duración de las etapas del ciclo son alteradas. La duración de la milpa puede verse prolongada hasta cinco a siete años gracias al uso de agroquímicos. El periodo de recuperación de la vegetación secundaria puede disminuir dependiendo de la necesidad y de las posibilidades del agricultor. Esta alteración del ciclo es una de las formas de intensificación del sistema

R-T-Q y conlleva una serie de dificultades en la restauración productiva del sistema, debido a problemas de erosión entre otros (Roffe *et al.*, 2004).

El presente estudio tiene como propósito evaluar la transformación del paisaje en un sistema agrícola R-T-Q con diferentes densidades poblacionales, utilizando un enfoque de modelación espacial y un índice de integridad del paisaje propuesto por Ochoa-Gaona *et al.* (2007).

2.2. Materiales

Se utilizó el programa de análisis estadístico R para la elaboración de las gráficas y algunos análisis básicos. Se emplearon los sistemas de información geográfica ArcGIS, IDRISI y Q-GIS para la elaboración de los datos geográficos.

El modelo se desarrolló utilizando el programa computacional DINAMICA EGO. Este programa fue originalmente diseñado para modelar deforestación con un enfoque orientado a patrones. Evolucionó hacia una plataforma de modelación lo suficientemente flexible para poder diseñar procesamientos *ad hoc* e integrar conocimiento experto y reglas orientadas a agentes, siendo así posible generar modelos de simulación de sistemas muy específicos (Mas *et al.*, 2014).

El modelo presentado aquí es conceptual en el sentido que no corresponde a ningún sitio particular y busca emular cualquier sistema R-T-Q. Sin embargo, se utilizó un modelo digital de elevación real de una región del sureste de México. El lugar fue seleccionado por la variedad de pendientes reflejado en el mapa de probabilidad de milpa. Se elaboró un mapa de pendiente con base en este modelo. Se elaboraron también mapas a) de producción agrícola potencial (FAO, 2014), b) de erosionabilidad con base en el mapa edafológico (INIFAP-CONABIO, 1995), c) de distribución de asentamientos humanos y d) CUS inicial en el cual todo el territorio está cubierto por bosques. Los parámetros de entrada fueron obtenidos de la literatura para poder compararlos con el índice de integridad propuesto por Ochoa-Gaona *et al.* (2007).

2.3. Métodos

2.3.1. Modelo *Roza-Tumba-Quema*

El modelo simula los CCUS en un paisaje en el cual se practica la R-T-Q. Está integrado de submodelos (Fig 2-1), que le confieren portabilidad y flexibilidad, facilitando su aplicación a otros ámbitos de forma genérica. El modelo funciona de forma iterativa con mapas en formato raster. A cada celda, se le asigna de forma dinámica valores y atributos del terreno de acuerdo a los requerimientos del modelo.

El modelo simula el establecimiento y el abandono de milpas emulando un sistema tradicional de



Figura 2-1: Esquema general del modelo de CCUS.

R-T-Q. El área cultivada depende del requerimiento calórico de la población y la locación de los cultivos, depende de las condiciones ambientales (aptitud del suelo y pendiente) y de la distancia a los asentamientos humanos. El modelo simula la pérdida de productividad a lo largo de la duración del cultivo, el abandono por falta de rendimiento, y el establecimiento del acahual. El modelo simula entonces la recuperación de la fertilidad del suelo de los acahuales. Simula también el crecimiento de la población, si la producción de milpa supe los requerimientos de ésta. Cuando el requerimiento calórico aumenta debido al crecimiento de la población, el modelo simula la abertura de nuevos espacios para establecer cultivos y eventualmente intensifica el ciclo de cultivo o simula el establecimiento de cultivos en sitios menos propicios.

Submodelo *CCUS*

Este submodelo realiza transiciones de bosque a milpa y de milpa a bosque, considerando como bosque los bosque conservado y los acahuales, desde el abandono del cultivo. La transición de bosque a milpa, se realiza de acuerdo a un mapa de probabilidad de cambio. El mapa de probabilidad, es definido por la aptitud del terreno, que combina la distancia a los asentamientos, la pendiente y la productividad potencial del terreno (Fig. 2-2), simulando el establecimiento de milpas en los sitios más aptos disponibles (lugares cercanos a los asentamientos, con pendiente moderada y con productividad potencial alta).

La milpa, después de establecida, comienza a perder productividad y es abandonada (transición de milpa a bosque). Esta última transición es también controlada por un mapa de probabilidad que

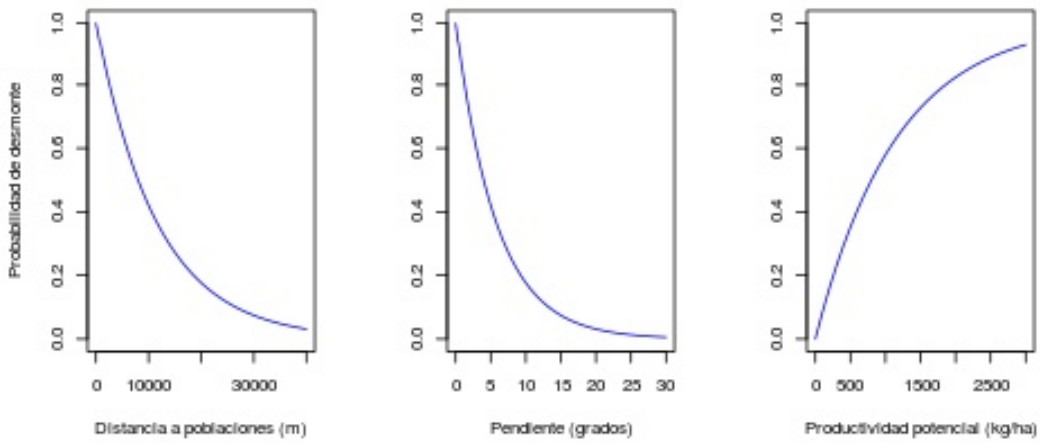


Figura 2-2: Relación entre variables medioambientales y probabilidad de desmonte (transición de bosque a milpa).

depende de la distancia a las poblaciones y de la productividad de la parcela (Fig. 2-3). La probabilidad de abandono del cultivo aumenta a mayor distancia y menor productividad. El bosque que se establece en una milpa abandonada, es un bosque joven (acahual) que permite la recuperación de la productividad del sitio (Ochoa-Gaona *et al.*, 2007).

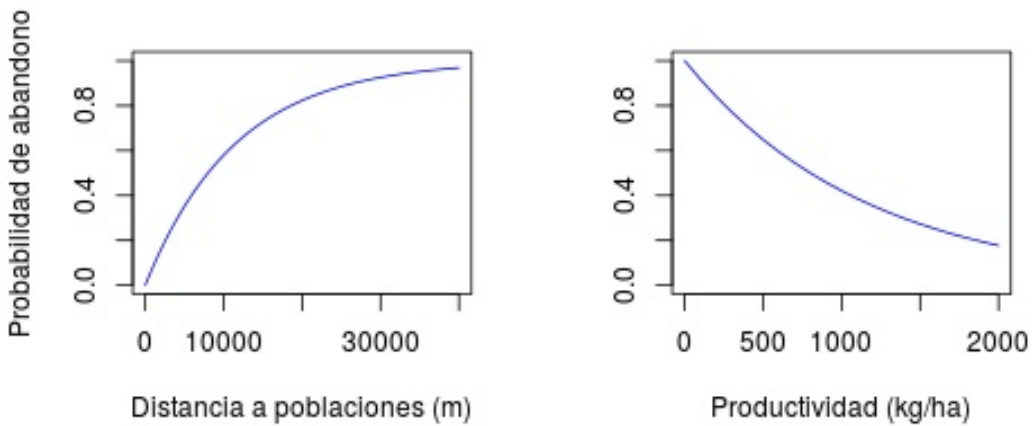


Figura 2-3: Relación entre variables medioambientales y probabilidad de abandono de un cultivo (transición de milpa a bosque).

Submodelo *Productividad*

Este submodelo calcula la disminución de la productividad de las parcelas a través de una función de decaimiento que toma en cuenta el tiempo transcurrido desde el inicio del cultivo. Esta disminución simula procesos de pérdida de fertilidad de la parcela, que hacen disminuir la productividad de las milpas (Cuanalo y Uicab, 2005; Soto Pinto *et al.*, 2011). El submodelo también simula el aumento de la fertilidad del suelo del acahual, y por ende de su productividad potencial. Si el entorno del acahual es mayormente forestal la fertilidad incrementa más rápidamente que cuando el entorno es deforestado (Fig. 2-4) debido a que se ha encontrado que el banco de semillas del bosque circundante favorece el proceso de sucesión y la recuperación de la fertilidad de las parcelas (Xolocotzi, 1988; Cuanalo y Uicab, 2005; Francisco Nicolás *et al.*, 2006).

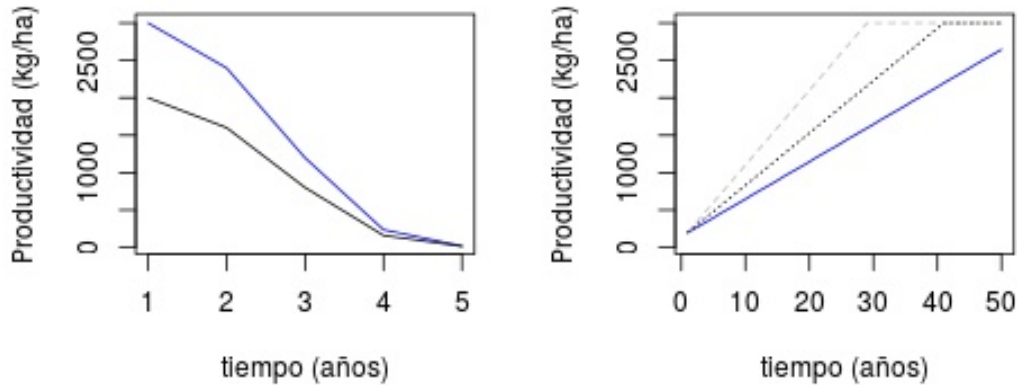


Figura 2-4: Cambio temporal de la productividad en cultivos (izquierda) y acahuales con diferentes entornos forestales (derecha).

Submodelo *Previsión*

Este submodelo calcula la producción de milpa necesaria para la población al inicio de cada iteración (Jasso y Becerra, 2003; CEIEG, 2010). Para ello, evalúa la cantidad de milpas poco productivas que serán probablemente abandonadas (milpas cuya productividad está por debajo de cierto umbral) y estima la producción esperada de las milpas no abandonadas. Tomando en cuenta eventuales excedentes del año anterior, calcula la cantidad de alimentos que faltan para cumplir con los requerimientos poblacionales. Evalúa entonces la productividad potencial de los bosques y acahuales con mayor probabilidad de desmonte, y estima la superficie de desmontes necesaria para la creación de nuevas milpas. En este

cálculo, hace una sobreestimación de 10% con el fin de evitar un desabastecimiento relacionado con las aproximaciones de las evaluaciones realizadas y eventualmente crear un excedente.

Submodelo *Crecimiento Poblacional*

Este submodelo simula el crecimiento de la población, utilizando una tasa de crecimiento linear. Si las condiciones permanecen adecuadas la población crece y se incrementan proporcionalmente los requerimientos alimentarios en el siguiente paso del tiempo. Si el sistema no produce la cantidad de alimentos requeridos; la tasa de crecimiento disminuye, y eventualmente llega a ser negativa si las malas condiciones son severas o persisten varios años.

Submodelo *Erosión-Productividad*

Este submodelo simula la erosión del suelo de las parcelas agrícolas y la pérdida de productividad asociada a ella así como la generación de suelo bajo cubierta forestal (Francisco Nicolás *et al.*, 2006) y complementa el submodelo *Productividad*.

La erosión se determina con base en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE) modificada (Renard *et al.*, 1997). Esta ecuación se usa para estimar la pérdida de suelo en superficies que experimentan flujo superficial. RUSLE estima la pérdida por el impacto de la lluvia en la ladera, tomando en cuenta el efecto de la pendiente y el tipo de cobertura; la erosión será más severa en áreas abiertas, como los cultivos, ubicadas en pendientes mayores (Merritt *et al.*, 2003; IUSS-WRB, 2007).

La ecuación es una multiplicación de cinco factores (Ecuación 2-1 y Fig. 2-5) (Suárez Giménez, 2008), cada factor es obtenido de forma independiente y se presenta en un mapa si tiene variación espacial.

$$E = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2-1)$$

El mapa del factor de erosividad de la lluvia (factor R) se determinó con base en un mapa de la precipitación media anual utilizando el conjunto de ecuaciones propuestas por Martínez Ménez (2005) para diferentes regiones de la República Mexicana.

La erosionabilidad del suelo (factor K), es la susceptibilidad del suelo a erosionarse dependiendo de su textura y estructura. Estos datos son obtenidos con base en un mapa edafológico asignando valores del factor K de acuerdo a la edafología de la zona de estudio.

El factor de longitud y grado de pendiente (factor LS), indica la dirección del flujo y los lugares donde se acumula este flujo. El factor fue obtenido a partir del modelo digital de elevación (MDE) del área de estudio e indica el grado de erosión de acuerdo a la pendiente, indicando valores altos cuando las laderas son pronunciadas y existe mayor flujo (Martínez Ménez, 2005).

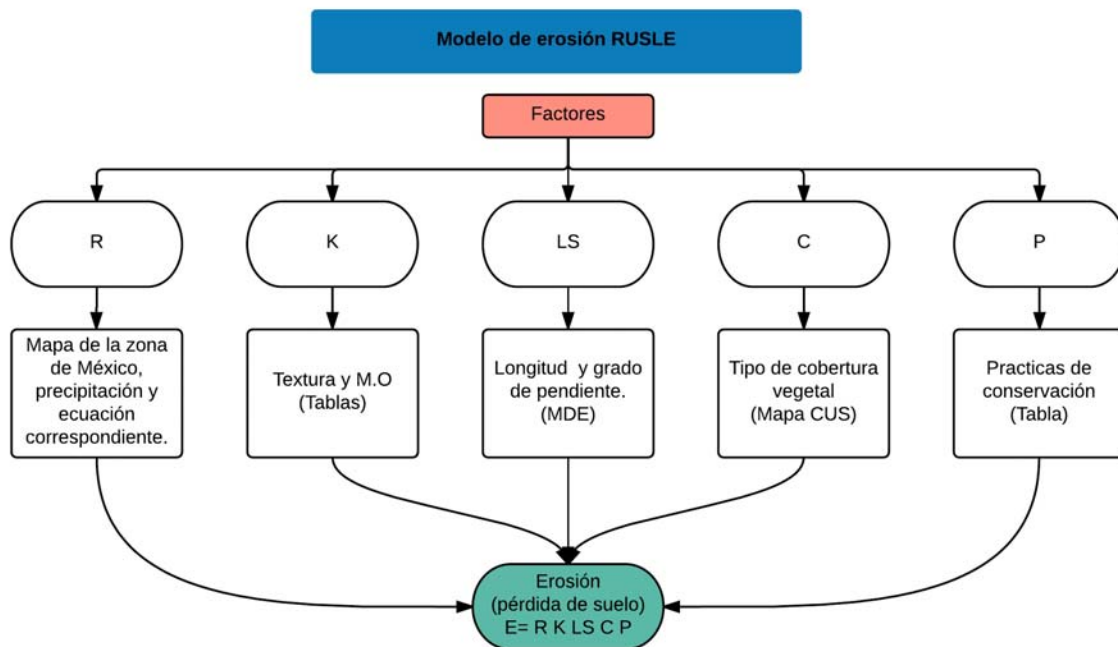


Figura 2-5: Ecuación RUSLE.

El factor C depende del tipo de cubierta vegetal: si la cubierta vegetal es mayormente forestal la erosión es menor. Al contrario, áreas desprovistas de vegetación son más propensas a la erosión.

Finalmente, el factor de prácticas de conservación (Factor P), representa la reducción de la erosión a medida que la práctica u obra de conservación es más eficiente (Martínez Ménez, 2005). En este estudio, no se tomó en cuenta ninguna práctica de conservación.

El submodelo genera un mapa que indica el valor de pérdida o ganancia por celda con unidades en ton/ha/año. Este mapa ingresa en el modelo de productividad, que convierte las pérdidas o ganancias de suelo en una disminución o aumento de la productividad. En un lugar donde existen altos niveles de erosión como pendientes pronunciadas, la parcela presenta una erosión alta, lo cual se traduce en menor tiempo de cultivo debido a la rápida pérdida de la fertilidad del suelo y de la productividad.

2.3.2. Modelo *Índice de integridad*

Este modelo es utilizado para analizar la serie temporal de mapas de CUS generados por el modelo de CCUS. El modelo calcula el índice de integridad (II) del paisaje propuesto por Ochoa-Gaona *et al.* (2007) de acuerdo a la ecuación 2-2. El índice incluye la duración de los períodos de descanso (AD), la

duración de los cultivos (AC) que representa la intensidad de uso de las parcelas y el número de períodos de cultivo (PC) que indica la frecuencia de uso de la parcela.

$$II = \frac{AD}{AC \times PC} \quad (2-2)$$

Se calculó el valor medio del índice con base en los mapas de CUS de todo el periodo de simulación. Se calculó también la evolución del índice a través del tiempo tomando en cuenta periodos de cinco años anterior a la fecha considerada (Fig. 2-6). El índice varía entre cero y el número de años del periodo considerado. Si una parcela es cultivada sin interrupción durante todo el periodo, $AD = 0$ y por lo tanto el valor del índice es también nulo. Al contrario, si una parcela es cultivada un solo año durante un largo periodo AD/AC es casi igual a la duración total del periodo considerado y $PC = 1$, por lo cual el índice tiene un valor cercano a la duración del periodo. Si una parcela nunca es cultivada durante el periodo considerado, se produce una división por cero ya que AC y PC son nulos. En este caso, se optó por asignar el valor de duración del periodo al índice. Ochoa-Gaona *et al.* (2007) mostraron con base en un muestreo florístico, que los acahuales de mayores edades e II tienen más especies nativas del bosque maduro.

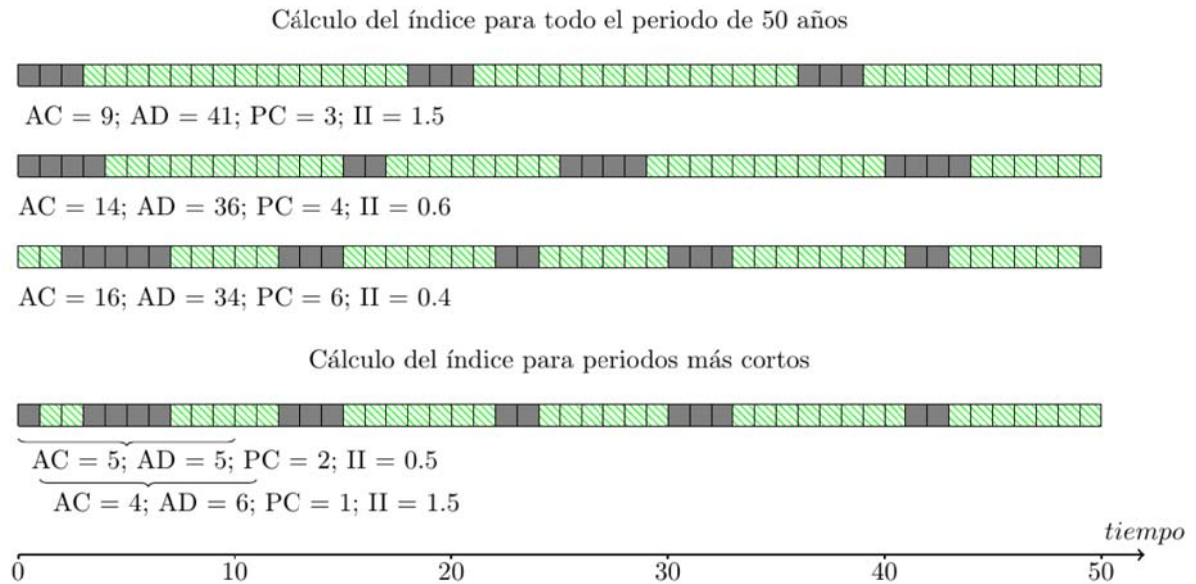


Figura 2-6: Cálculo del índice de integridad para una celda. Cada cuadro representa un año en cultivo (gris) o vegetación secundaria (verde).

2.3.3. Parámetros utilizados

El modelo requiere varios parámetros iniciales para realizar la simulación (Tabla 2-1). Los parámetros fueron definidos a través de una revisión de la literatura. De acuerdo a Jasso y Becerra (2003), la necesidad calórica diaria de un adulto es de 1900 calorías aproximadamente, y un kilogramo de maíz aporta alrededor de 900 calorías. Los rendimientos de producción de maíz que se encontraron en la literatura fueron muy contrastantes, desde 1250 hasta 2676 kg/ha sin uso de agroquímicos. Por ejemplo, Cuanalo y Uicab (2005) mencionan que en sus experimentos en Yucatán obtuvieron rendimientos de 1556 a 2676 kg/ha, otros fuentes reportan valores de 800 a 2500 kg/ha (FAO, 2014; Van der Wal *et al.*, 2006). En el modelo, usamos un valor medio de 2000 Kg/ha. En cuanto a las densidades poblacionales utilizamos las encontradas en la selva maya de Chiapas en la actualidad. Específicamente, en el municipio de Ocosingo, la densidad varía de 0.06 hb/ha en comunidades aisladas a 0.14 hb/ha en las zonas rurales. En Altamirano, se reportan densidades de 0.12 hb/ha en poblaciones aisladas y de 0.17 hb/ha en comunidades rurales (CEIEG, 2010). Realizamos por lo tanto diferentes simulaciones con tres valores de densidad de población, sin simular crecimiento poblacional (tamaño constante de la población).

Tabla 2-1: Parámetros del modelo

Parámetros	Valores utilizados		
Densidad poblacional (hab/ha)	0.08	0.12	0.18
Tasa de crecimiento anual	0 %		
Calorías necesarias por persona/día.	1900 calorías		
Producción potencial inicial	2000 kg/ha		
Calorías en un kilogramo de maíz	900 calorías		
Producción mínima aceptada por milpa	400 kg/ha		
Distancia máxima de cultivo	8 km		
Periodo de simulación	50 años		

2.4. Resultados

El modelo simula la intensificación del uso de suelo, en tres casos de densidad poblacional y evalúa la integridad del paisaje (Tabla 1). Los resultados fueron divididos en dos secciones, la primera describe los CCUS simulados para cada densidad. En la segunda parte, analizamos la integridad del paisaje a través del índice de integridad (II). Los mapas de CUS simulados se analizaron desde el décimo año de la simulación cuando se estabiliza el comportamiento de las variables modeladas.

2.4.1. Cambios de cubierta y uso del suelo

El mapa final de las simulaciones realizadas con las diferentes densidades de población (Fig. 2-7), muestra la cantidad de milpas en uso al cabo de 50 años, el área de acahuales y de bosque dejado intacto durante el periodo de simulación. Se puede observar que, lógicamente, a mayor densidad poblacional, mayor superficie cultivada. Como consecuencia del aumento del área de milpa, la cantidad de acahuales también aumenta, y disminuye la proporción del bosque nunca convertido a cultivo.

Encontramos también diferencias en las edades de los acahuales y de las milpas según la densidad simulada. En las densidades 1, 2 y 3, la edad promedio de los acahuales es respectivamente 11, 10 y 8 años, con una desviación estándar de 9.4, 8.5 y 6.2 años, indicando que, a mayor densidad la edad promedio disminuye y los valores de edad son más homogéneos. También observamos una ligera disminución de la duración del periodo de cultivo: 2 años para las densidades 1 y 2, 1.98 en la densidad 3. Las diferencias en la edad promedio de los acahuales están relacionadas con la estructura de las edades. En la figura 2-8, se puede observar que en la densidad 1, existen una gran cantidad de acahuales cuya edad es superior a 15 años, lo cual no ocurre para las densidades mayores. La Figura 2-9 representa la distribución espacial de las clases de edad.

Estos cambios en la duración del periodo de descanso están relacionados con la recuperación de la fertilidad en los acahuales. Para la densidad 1, la superficie de milpa es menor y 70% de estas milpas presentan una productividad superior a 1200 kg/ha. En densidades poblacionales mayores (Densidades 2 y 3), aumenta la proporción de cultivo con producción entre 600 y 1200 kg/ha (Fig. 2-10). Las simulaciones muestran que conforme aumenta la densidad poblacional, la permanencia de los acahuales es menor, esto debido a que son utilizados como milpas antes de recobrar la totalidad de la productividad potencial. Las milpas se establecen en lugares menos fértiles, lo cual tiene como consecuencia que inician con menor producción por lo que será abandonada rápidamente.

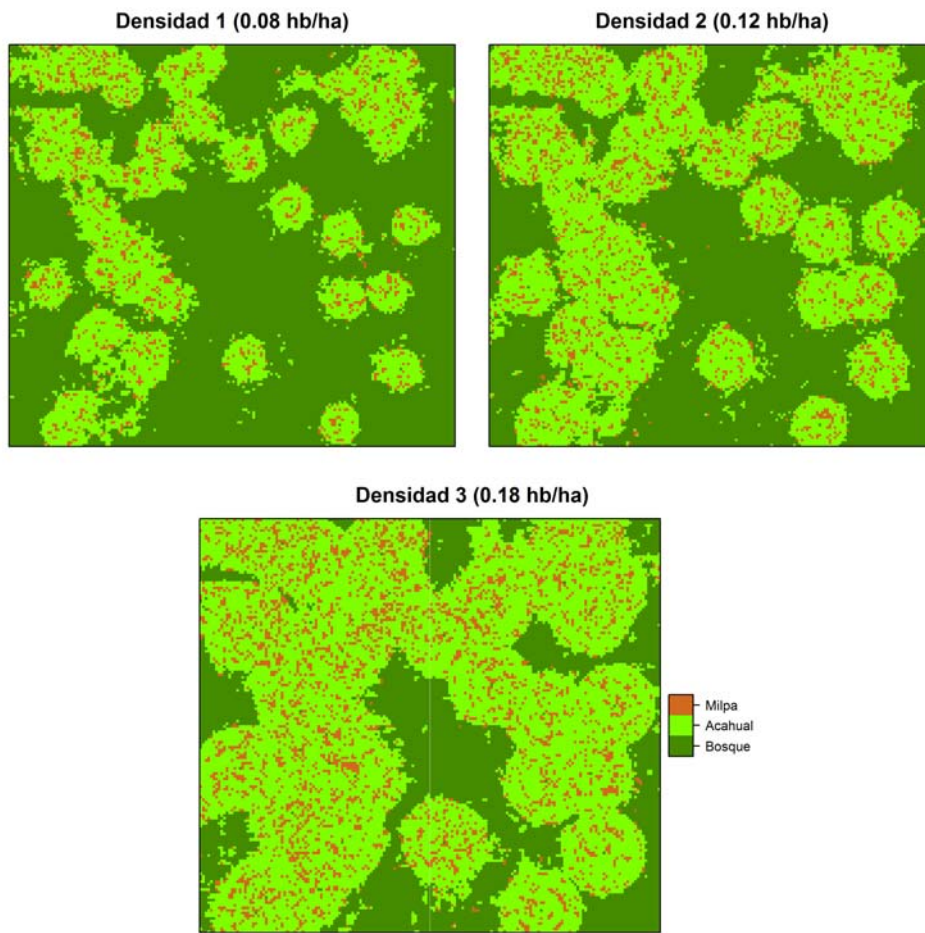


Figura 2-7: Cubiertas agrícolas y forestales (bosque conservado y acahual) modeladas después de 50 iteraciones con las tres densidades poblacionales. Tamaño de pixel una hectárea.

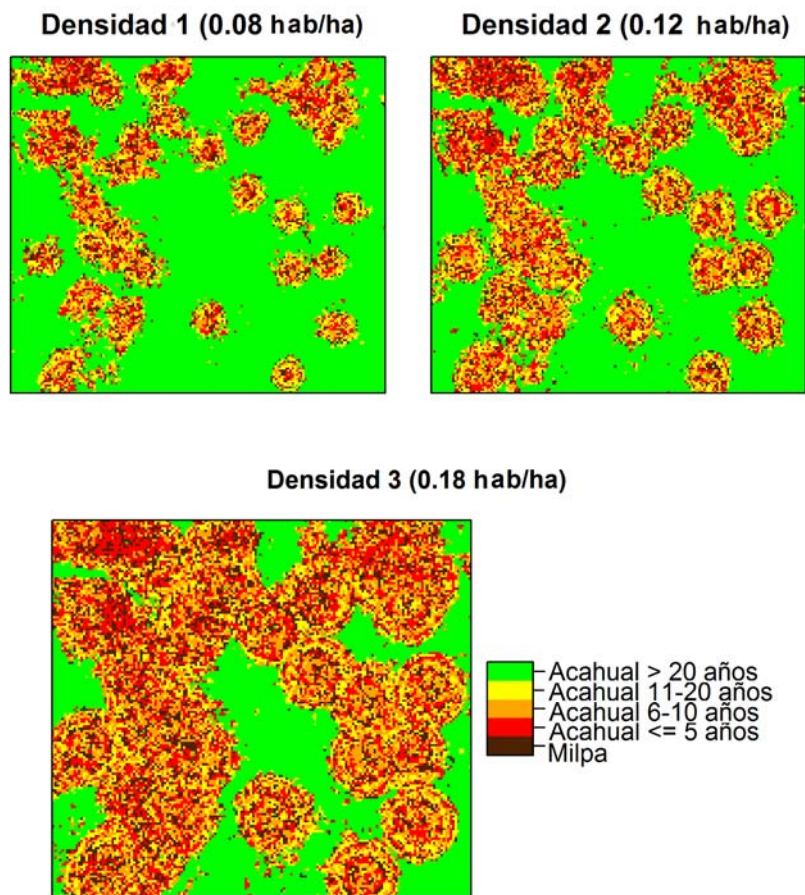


Figura 2-8: Edad de los acahuales al final de la iteración 50. Los acahuales mayores a 20 años incluye el bosque que nunca ha sido milpa.

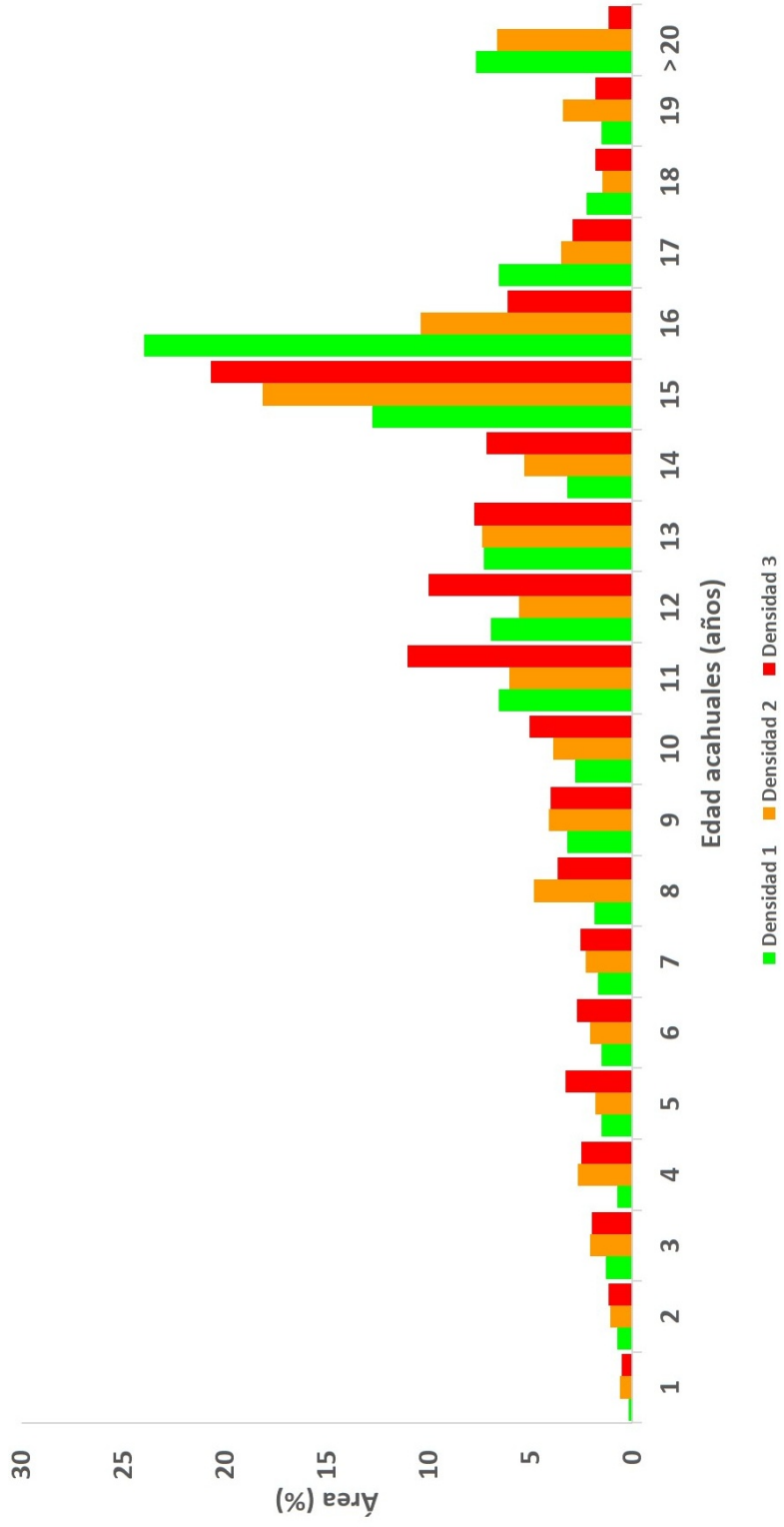


Figura 2-9: Porcentaje de superficie ocupado por acahuales de distintas edades después de 50 iteraciones.

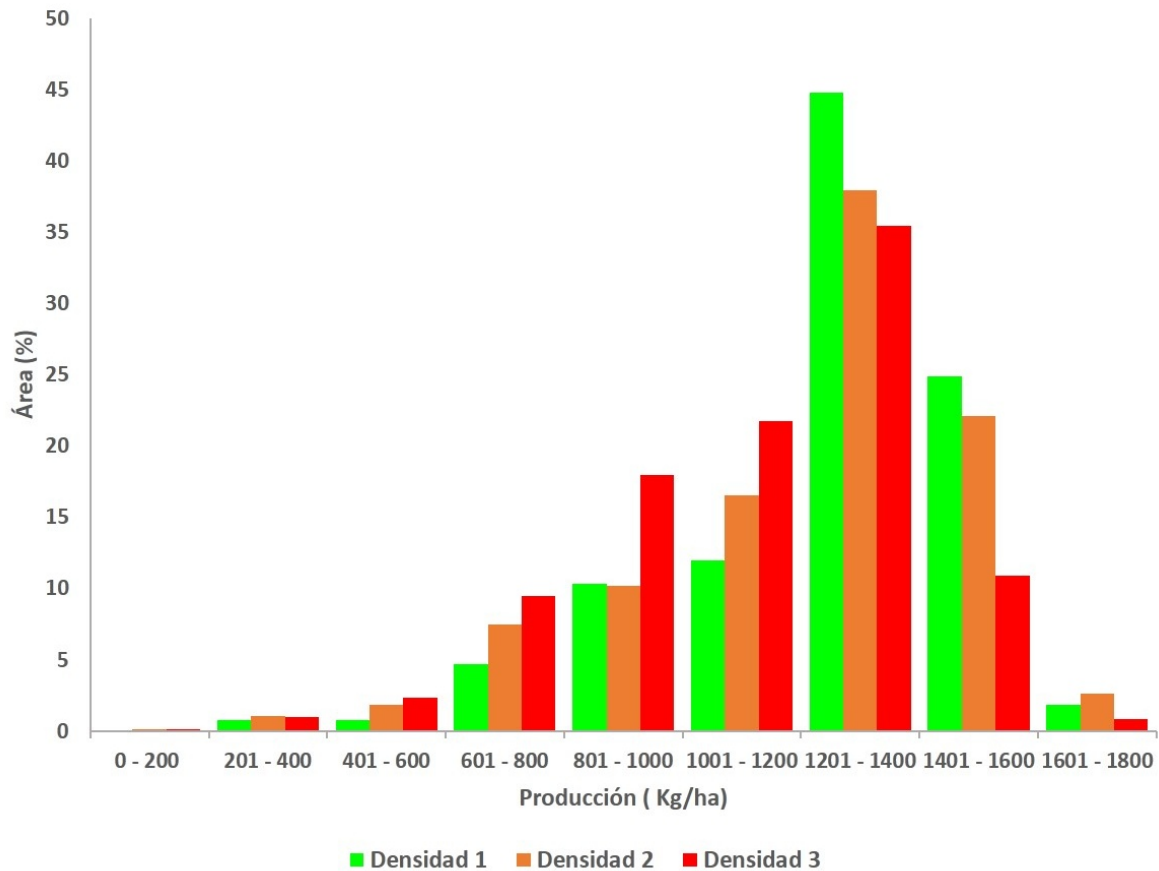


Figura 2-10: Porcentaje del área de milpas de diferentes clases de productividad después de 50 iteraciones.

La figura 2-11 muestra la dinámica del sistema R-T-Q en el tiempo. A partir de 20 años, en las densidades 1 y 2, la superficie de milpa se mantiene en el tiempo. En el caso de la densidad 3, es posible observar un ligero incremento de esta superficie. Se observan las mismas tendencias para los acahuales. La duración de las milpas se mantiene en el tiempo para las densidades 1 y 2, y disminuye para la densidad 3. Para las densidades 1 y 2, la duración media de los acahuales aumenta durante todo el periodo de simulación porque se incorporan áreas de bosques intactos en el ciclo agrícola y se dejan madurar los acahuales por un largo periodo de descanso. En la densidad 3, la duración media de los acahuales deja de aumentar a partir del año 20 porque los acahuales son más rápidamente convertidos de nuevo en cultivo. Los valores altos de la desviación estándar indican una gran variabilidad de la edad de los acahuales.

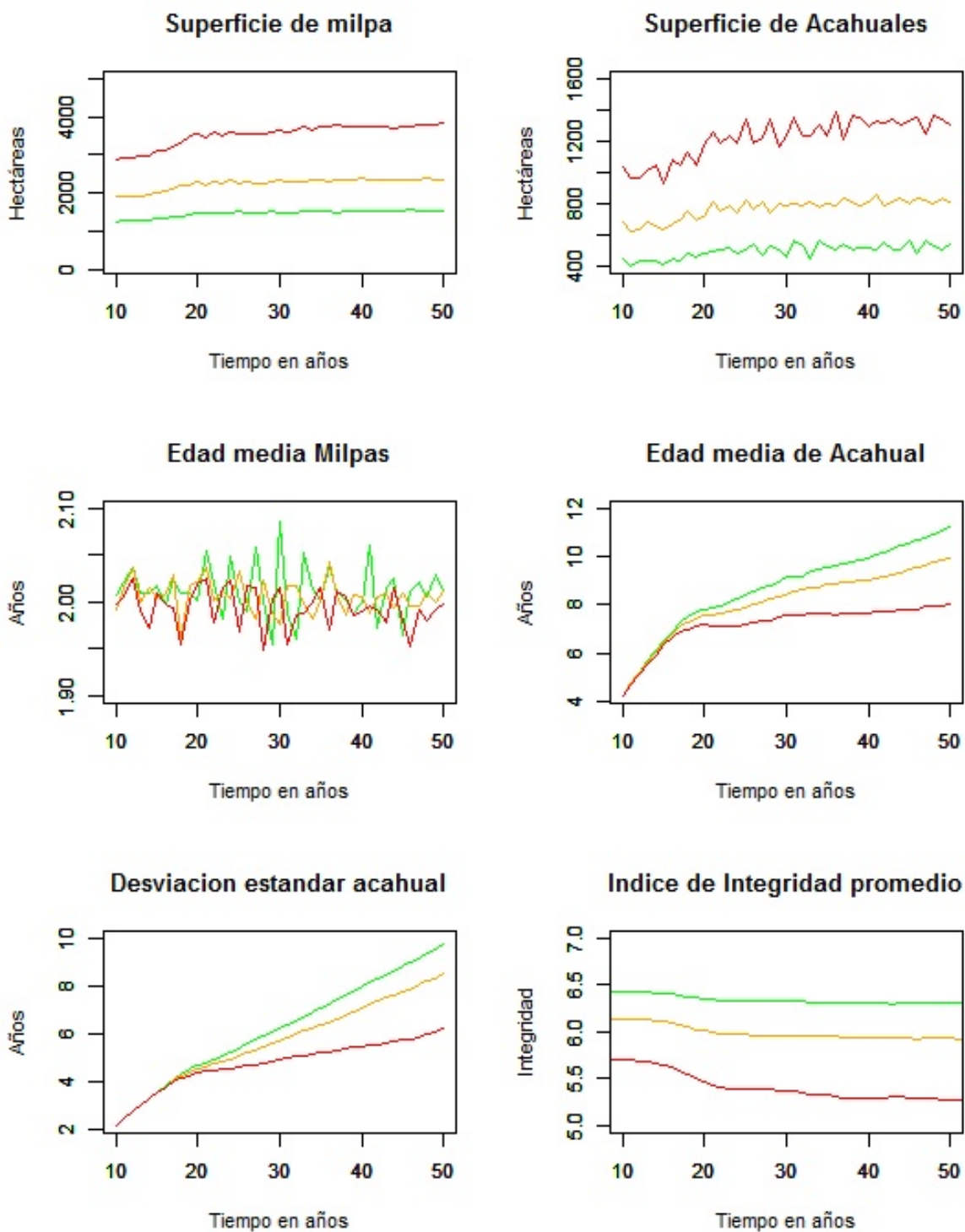


Figura 2-11: Evolución temporal de algunas variables describiendo el sistema R-T-Q. En verde Densidad 1 (0.08 hab/ha), en amarillo Densidad 2 (0.12 hab/ha) y en rojo Densidad 3 (0.18 hab/ha).

2.4.2. Integridad del paisaje

Los mapas del índice de integridad del paisaje a 50 años (Fig. 2-12) indican valores máximos de 50 en todas las densidades, este valor es asignado a los bosques que quedaron intactos durante el periodo modelado. Se puede observar el impacto de la población en la periferia de los asentamientos humanos, extendiéndose el área agrícola a mayor densidad poblacional. Los valores del índice de integridad están altamente relacionados con la densidad poblacional: en la densidad 1, observamos una gran cantidad de área con un índice de integridad de 50, mientras que en las densidades 2 y 3, predominan las áreas con un índice de integridad inferior a 10 (Fig. 2-13). Los acahuales tienden a tener un índice de integridad más bajo debido al acortamiento del periodo de barbecho y el aumento de la frecuencia de cultivo.

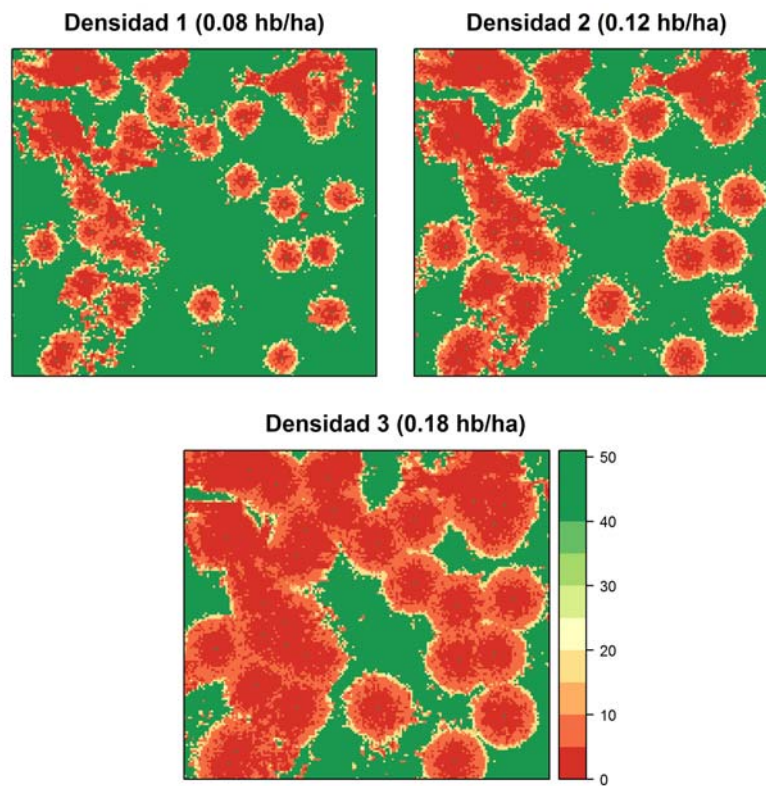


Figura 2-12: Índice de integridad de las cubiertas modeladas después de 50 iteraciones con las tres densidades poblacionales.

En la Fig. 2-11 se puede observar que el valor promedio del índice de integridad tiende a disminuir a lo largo del tiempo. En la densidad 1, esta disminución es muy reducida, lo que sugiere un equilibrio dinámico en el cual las parcelas se rotan entre milpa y acahual sin que la duración del periodo de descanso disminuya de forma importante. Al contrario en la densidad 3, el índice de integridad tiene una importante disminución mostrando un deterioro del paisaje.

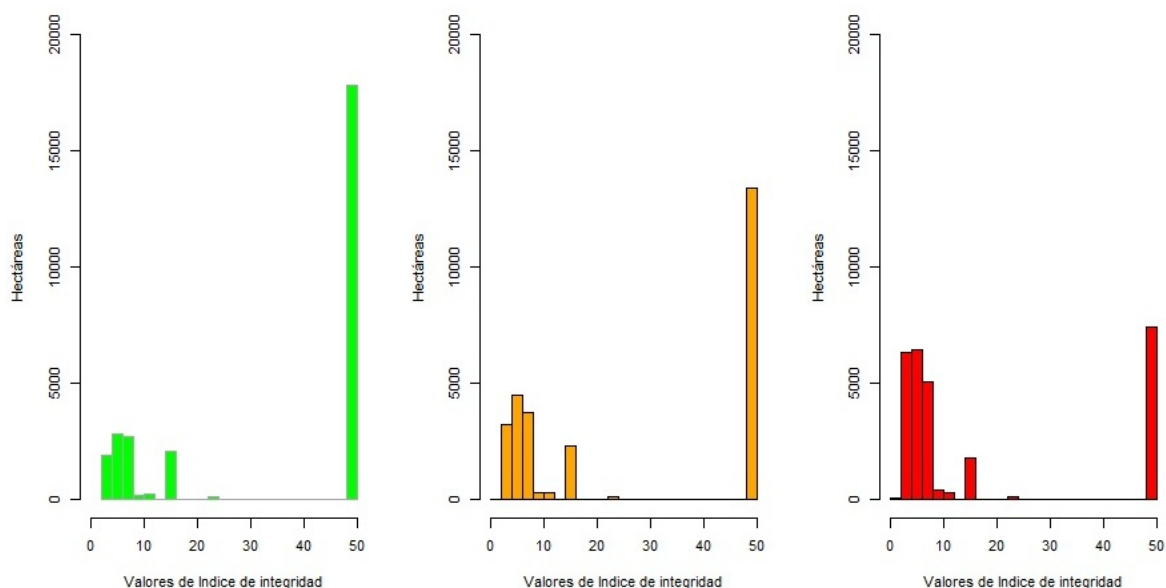


Figura 2-13: Superficie de diferentes clases del índice de integridad para los tres casos de densidad poblacional.

2.5. Discusión

Los bosques tropicales han sido históricamente sometidos a procesos de cambio de uso de suelo durante los cuales han sido convertidos en zonas agrícolas (Torres *et al.*, 2014). En México, la cubierta forestal *per capita* era de 0.5 ha en 2002 y se proyecta en 0.3 ha en 2025, por debajo de la media mundial (Velázquez *et al.*, 2002), destacando la importancia de un manejo sustentable de los sistemas agrícolas y forestales del país (Ayala Sánchez *et al.*, 2009).

El sistema tradicional R-T-Q, es comúnmente usado en México para cultivar maíz, frijol y calabaza que son la base de la alimentación y constituye una forma de manejo de una gran parte del territorio nacional. La agricultura de R-T-Q es actualmente el foco de una discusión en donde se cuestiona su sustentabilidad (FAO, 2009b). Algunos autores aseguran que este tipo de agricultura es un sistema poco sustentable a largo plazo (IUSS-WRB, 2007; Jaramillo *et al.*, 2010). Sus beneficios inmediatos en la fertilidad del suelo después de la quema es mayormente aceptado, puesto que provee formas disponibles de nitrógeno y fósforo, mayor mineralización y potencial de nitrificación. No obstante, sus efectos a largo plazo son problemáticos, ya que su uso está relacionado a la degradación debido a que después del primer año se reduce progresivamente la disponibilidad de los nutrientes y el fuego reduce los almacenes de nutrientes en las formas orgánicas que se encuentran en las primeras capas del suelo (Jaramillo *et al.*, 2010; Villalobos-Zapata y Mendoza Vega, 2010; Borrego *et al.*, 2015). Sin embargo, en esta discusión es

importante considerar el tiempo de barbecho, que es usado para que el suelo restablezca la fertilidad a través del proceso natural de sucesión vegetal que provee el paisaje de vegetación. En este sentido, diversos trabajos argumentan que la agricultura migratoria tradicional es más sustentable que otros sistemas, porque los acahuales proveen funciones y servicios ambientales, a través de reservorios de algunas especies nativas, y mantienen la conectividad con los fragmentos de bosque maduro, amortiguando así el efecto de la fragmentación y degradación (Ochoa-Gaona *et al.*, 2007; Astier *et al.*, 2008).

Se ha estigmatizado el sistema R-T-Q debido a los efectos de su intensificación (Soto Pinto *et al.*, 2011). La intensificación agrícola puede realizarse de diversas formas para tratar de obtener la misma producción en menor tiempo y/o superficie, ya sea minimizando el tiempo de descanso o maximizando el área de cultivo, por ejemplo, aumentando la densidad de plantas (Van der Wal *et al.*, 2006). Los sistemas agrícolas no han sido todos intensificados de igual manera. En Asia, el incremento de la producción de alimentos ha sido mediante el uso de fertilizantes y de riego. En la mayor parte de África y América Latina, se hizo a través del aumento de la extensión de la agricultura (Lambin *et al.*, 2003; FAO, 2009b).

En la agricultura R-T-Q la intensificación más común es recortando el tiempo de barbecho. Esta reducción del tiempo de descanso tiene por consecuencia que nuevas milpas inicien cuando las especies pioneras arbóreas aún no se han establecido, lo cual, aunado al incremento de la aplicación del fuego, afecta el banco de semillas, y por lo tanto disminuye la riqueza florística del siguiente acahual (Ochoa-Gaona *et al.*, 2007; Aguilar-Jiménez *et al.*, 2011; Soto Pinto *et al.*, 2011).

Ante el panorama antes mencionado acerca del sistema R-T-Q, en especial en México donde es comúnmente usado, creemos que la modelación espacial puede ayudar a entender mejor los procesos de cambio y de degradación relacionados con la intensificación en diversas condiciones. La modelación del índice de integridad permite sintetizar información sobre la frecuencia y la duración de los periodos de cultivo y de barbecho. Sin embargo, estos modelos se basan en una simplificación del sistema real y estamos conscientes de las limitaciones de la simulación de procesos complejos como los CCUS (Paegelow *et al.*, 2013). En este caso, podemos mencionar algunas limitaciones del modelo. En primer lugar, en la modelación, la intensificación está relacionada como la densidad poblacional. En realidad, en regiones donde las actividades agrícolas no son exclusivamente para la subsistencia, la intensificación se relaciona más con aspectos de mercado o de políticas de fomento que con la población. Por otro lado, la intensificación se realiza a través del acortamiento del ciclo de producción y descanso cuando existen otras formas de intensificación como las anteriormente mencionadas y que no presenta el modelo. El modelo simula la disminución de la producción de una milpa a lo largo del tiempo (Jaramillo *et al.*, 2010), y por lo tanto esta disminución productiva depende únicamente del tiempo, ya que el modelo no modela la pérdida de nutrientes de forma explícita, lo cual podría permitir tomar en cuenta otros factores. De la misma forma, no se modela el proceso de reconstitución del suelo en el ciclo de la sucesión natural de

la vegetación, sino que el aumento de la productividad potencial de un acahual solo depende del tiempo y de la proporción de bosque en el entorno de la celda. Otras limitaciones son la falta de interacción con otros usos del suelo, pues muchas veces se encuentra a la R-T-Q, en un sistema mixto, donde co-existe con otras actividades productivas como la ganadería y la agricultura permanente, las cuales pueden en muchas ocasiones tener un mayor impacto en el paisaje (Tacher y Rivera, 2000; Cruz León *et al.*, 2004).

Finalmente el índice de integridad no es un índice espacialmente explícito en el sentido que no toma en cuenta los patrones de conectividad y fragmentación en el paisaje. Sin embargo, las simulaciones nos muestran posibles ciclos y sucesiones de los CUS a través del tiempo en diferentes niveles de intensificación. Por otro lado, el modelo es flexible y permite implementar la simulación de otros procesos. Finalmente, los mapas de paisaje simulados durante un periodo de tiempo podrían ser comparadas con datos multitemporales obtenidos a partir de imágenes de satélite.

Las limitaciones entonces pueden dividirse en dos las que son propias e inherentes al modelo, en este caso el software no tendrá la capacidad de igualar la totalidad de las conexiones complejas que el sistema R-T-Q conlleva en su proceso real y las limitaciones que tienen que ver con los insumos y parámetros, ya que en ocasiones los insumos adecuados que permitan simular no se encuentran disponibles en el área de estudio y muchas veces es necesario hacer aproximaciones para el área de estudio.

El modelo nos ayuda a entender las condiciones de sostenibilidad del sistema a través de la observación de las dinámicas observadas en la simulación: El equilibrio dinámico entre diferentes usos y cubiertas del suelo (densidad poblacional 1) o bien al contrario la tendencia de pérdida progresiva de la integridad del paisaje (densidad 3), derivando en un posible colapso (Scheffer *et al.*, 2009).

En futuras investigaciones, el modelo podría tomar en cuenta otros factores de CCUS como la ganadería en un paisaje real a través de mapas obtenidos del análisis de datos de percepción remota. Los parámetros del modelo podrían obtenerse de encuestas de terreno en la zona de estudio y los resultados validarse con datos de flora y fauna.

2.6. Conclusiones

Se desarrolló un modelo que simula los cambios de cubierta y uso del suelo en un sistema de roza, tumba y quema en diferentes niveles de intensificación. Los paisajes simulados en los mapas prospectivos se evaluaron con la ayuda de un índice de integridad que toma en cuenta la frecuencia y la duración de los diferentes elementos del ciclo de R-T-Q. Dependiendo de la cantidad de producción agrícola exigida al sistema, el paisaje presenta diferentes comportamientos. A bajos niveles de intensificación, se observa un equilibrio dinámico en el cual los diferentes elementos del paisaje cambian en el espacio pero conservan su área total y algunas características como la edad y el índice de integridad. A niveles de intensificación

más altos, el sistema tiende a degradarse ya que los tiempos de barbecho se acortan cada vez más y el área agrícola aumenta debido a la pérdida de productividad.

A través de la modelación espacio-temporal, es posible la formulación de hipótesis sobre procesos relacionados con el uso del suelo, las actividades antrópicas y el impacto ambiental que estas actividades pueden generar. La modelación permite entrelazar el conocimiento histórico sobre las prácticas agrícolas e información sobre los cambios de uso del suelo y los procesos ecológicos que normalmente se encuentran dispersos y son el objeto de análisis independientes. La modelación puede por lo tanto ayudar a llevar a cabo estudios interdisciplinarios y, adicionalmente, agrega un componente espacial para la comprensión de los procesos modelados.

Capítulo 3

SIMULACIÓN DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DEL SUELO EN EL REINO DE CALAKMUL DURANTE EL CLÁSICO TARDÍO (600-900 D.C.)

3.1. Introducción

La civilización maya es considerada como una de las culturas prehispánicas de mayor importancia y complejidad en México y Latinoamérica, debido a características; como su medio natural, desarrollo tecnológico, modo de organización social, gobierno y conocimientos científicos. Al igual que otras civilizaciones los mayas fueron una sociedad cazadora-recolectora y agrícola que transformó los ecosistemas alrededor de los asentamientos que estableció (Lhuillier, 1981; Sanders *et al.*, 1968).

El uso de los recursos es de especial interés en la cultura Maya debido al papel que pudo tener en la desocupación de gran parte de su territorio durante el periodo Clásico Tardío (Harrison y Turner II, 1978; Zamora, 1978). La desocupación es denominada por algunos autores como “Colapso” y existe puntos de vista contradictorios al respecto (Culbert, 1995), algunos autores han sugerido una sequía que duro entre 50 y 130 años, que se extendía por toda la península de Yucatán en el Clásico Maya, y que desempeñó un papel importante en la desocupación de las tierras bajas mayas (Culbert y Rice, 1990). Según esta hipótesis, la sequía limitó la capacidad del medio ambiente impactando negativamente a las sociedades mayas, derivando en problemas socio políticos y de permanencia (Medina-Elizalde *et al.*, 2012).

Aunado existe controversia de los componentes antrópicos que pudieron llevar a esta situación, especialmente dos vertientes que involucran el Cambio de Cobertura y Uso del Suelo (CCUS): a) la población en el área; tanto la distribución de los asentamientos como la cantidad de personas que ahí vivían y b) los sistemas de cultivo que permitieron abastecer a esta población. Estos dos puntos han sido discutidos entre el gremio arqueológico, donde la mayoría coincide con las altas densidades (Harrison y Turner II, 1978). En el caso de los sistemas de cultivo necesarios para abastecer a las altas densidades de la población existe mayor desacuerdo, considerando que no es posible la permanencia de densidades tan altas con el uso del sistema tradicional de Roza-Tumba-Quema (R-T-Q), por lo que el uso de prácticas intensivas fue

necesario (uso de los bajos, cultivo traspatio, bosque artificial, terrazas, campos elevados y arboricultura) (Yoffee y Cowgill, 1991; Turner y Sabloff, 2012). Algunos mencionan que aún con prácticas intensivas, el medio ambiente circundante no era suficientemente productivo para abastecer a la población (Gutiérrez, 2009). Entonces las prácticas intensivas son un punto crítico, ya que no se concibe tanta población sin estas prácticas, pero el hecho de tener un recurso tan esencial como el agua, de forma limitada en la zona, hace difícil la visualización de sistemas alternos al tradicional R-T-Q (Zamora, 1978; Harrison y Turner II, 1978).

En tiempos prehispánicos era importante el poder sobre los recursos hidráulicos, particularmente las represas que almacenaban el agua durante la temporada de secas y que podían ser indispensables para la supervivencia de los campesinos en zonas donde no había fuentes permanentes de agua. La guerra jugaba un rol importante, haciendo necesario en muchos casos, la protección ofrecida por los centros de poder y requería la movilización conjunta de la colectividad (Bray *et al.*, 2004a). La adición de prácticas intensivas permitiría el establecimiento de mayor número de personas en el área. El incremento de la población también puede derivar en la intensificación de la R-T-Q a través de la extensión de superficie o la reducción del tiempo de descanso los cuales derivan procesos intensos de deforestación y degradación como lo vimos en el capítulo anterior (Beach *et al.*, 2006; Denevan y Turner II, 1974; Zamora, 1978; Culbert, 1995; Diamond, 2006).

Se cree que las comunidades mayas que tenían “vínculos intangibles” que mantenían unidas a las comunidades y las hacían gravitar hacia los centros de dominación política (Wolf, 1967; Viveiros de Castro y Lévi-Strauss, 2004). Estas fuerzas centrípetas tenían su fundamento en las relaciones de reciprocidad y asistencia mutua que se establecían en el seno de las familias extensas y los patrilinajes en que se organizaba la sociedad maya. A partir de esos vínculos se establecían y mantenían la cohesión y la cooperación de las comunidades campesinas que eran clave para su supervivencia; y a la vez, estos vínculos eran también un importante mecanismo de movilidad, pues permitían establecer con relativa facilidad nuevos lazos de cooperación en casos de mudanzas o comunidades distantes de las comunidades de origen (Lhuillier, 1981; Viveiros de Castro y Lévi-Strauss, 2004). Algunas hipótesis mencionan que los conflictos socio-políticos fueron los responsables del deterioro de las sociedades del reino Maya (McNeil *et al.*, 2010; Medina-Elizalde *et al.*, 2012). En general se cree que los colapsos de las civilizaciones se debían a una combinación de factores ambientales y sociales (Gunn *et al.*, 1995; Folan *et al.*, 2000; Gunn y Folan, 2000).

A través de los modelos espaciales de CCUS, desarrollados para la simulación de dinámicas ambientales es posible trazar la evolución del paisaje del pasado y actuales, observando el comportamiento espacio-temporal característico de la zona y construir escenarios plausibles, contribuyendo a comprender

la evolución del paisaje y probar teorías que explican la evolución de eventos pasados como el Colapso Maya” (Kohler *et al.*, 2012b; Yu *et al.*, 2012; Chang-Martínez *et al.*, 2015).

La información que proporcionan los registros arqueológicos sirve para probar hipótesis a través de los modelos de CCUS. Por ejemplo; la información sobre el territorio de los Maya, sus costumbres, y tecnologías. Esta información nos permite simular áreas cultivadas, a partir de una serie de combinaciones de factores sociales (número de habitantes, tiempo de ocupación, movilidad, etc.) y ambientales (disponibilidad de agua, calidad de los suelos, vegetación y precipitación) y que proporcionan información importante como insumos al modelo de CCUS aquí propuesto (Carrasco y Colon, 2005). Este modelo pretende simular los cambios de uso del suelo históricos de la civilización Maya en Calakmul, desde diferentes hipótesis para los efectos de los cambios en las poblaciones que ahí habitaban.

3.2. Antecedentes

3.2.1. Calakmul Clásico Tardío (600-900 D.C.)

La mayoría de las ciudades estado de mayor importancia en las tierras bajas mayas alcanzaron su máxima extensión durante el periodo Clásico Temprano (Yoffee y Cowgill, 1991). Los mayas durante el Preclásico tuvieron grandes transformaciones socio políticas que definieron la civilización Clásica. Durante el Clásico Tardío la civilización Maya en general vivió momentos de esplendor y alcanzó su clímax social, político y cultural manifestado en el arte y en el aumento de la población, como lo muestran los grandes centros ceremoniales. Calakmul no quedó exento de este desarrollo y en el Preclásico Medio hubo presencia regional de Calakmul que continuo durante el Clásico y Clásico Tardío mostrado por la amplia distribución del Glifo Emblema, mostrándose como uno de los más grandes centros Ceremoniales y Ciudad Estado de las tierras bajas mayas. También es conocido que al final del Clásico Tardío ó Clásico Terminal se dejaron de construir representaciones de poder como las estelas, y se observa una disminución de la población en el Reino de Calakmul y otros grandes centros ceremoniales de tierras bajas mayas (Carrasco y Colon, 2005).

La Ciudad Estado de Calakmul fungió como un centro ceremonial de gran importancia y como figura de poder durante el Clásico (Zamora, 1978). A pesar de los pocos afluentes de agua perennes que existen en el área de Calakmul los mayas se establecieron. En este sentido, la temporada de lluvia jugaba un papel importante en el desarrollo de Calakmul. Para poder permanecer en el área se cree debieron tener una organización social compleja y un sistema hidráulico de retención y transporte de aguas sofisticado (Domínguez-Carrasco y Folan, 1996). Existe documentación de los cambios en el paisaje de Calakmul, del periodo del establecimiento de los primeros asentamientos, permanencia, así como su posterior desocupación, donde el cambio del uso del suelo y utilización de los recursos parecen haber sido

parte fundamental para el desarrollo de Calakmul y la civilización Maya en general (Domínguez-Carrasco y Folan, 1996; Domínguez-Carrasco y Folan Higgins, 1998; Folan *et al.*, 2009).

3.2.2. Ocupación y distribución de pueblos Mayas en la región de Calakmul

La ciudad de Calakmul fue ocupada de manera continua desde el Preclásico Medio hasta el Clásico Terminal (800-900 D.C.). En el registro arqueológico está particularmente bien representado desde el Preclásico Tardío, el Clásico Temprano y el Clásico Tardío. La información arqueológica de Calakmul indica que la ciudad tenía más de seis mil estructuras y que durante el periodo Clásico constituyó el reino de Kaan (Folan *et al.*, 2000; Domínguez-Carrasco y Folan, 2010; Domínguez-Carrasco y Folan Higgins, 2015). La mayoría de las construcciones de la ciudad de Calakmul están distribuidas a lo largo de la orilla del bajo llamado “El Laberinto”, que dependía de la precipitación estacional para su llenado. El agua potable era suministrada por un sistema hidráulico con estructuras naturales como los bajos y artificiales como los chultones y las aguadas (captadores de agua en suelos impermeables con manejo antrópico) (Gunn y Folan, 2000; Domínguez-Carrasco y Folan, 1996). La población fue creciendo en torno a las fuentes de agua, desarrollándose en un promontorio kárstico, y se piensa que para satisfacer las necesidades primarias cada asentamiento tomaba los recursos naturales a una distancia razonable de 5 km (Folan *et al.*, 1995).

La literatura arqueológica refiere que los pueblos mayas tenían y tienen una estrecha relación con el ambiente y la distribución de sus asentamientos dependía del conocimiento que las personas tenían de su entorno. En la actualidad los asentamientos localizados y georeferenciados comprenden sitios arqueológicos conocidos como centros urbanos, cuyo material de construcción hizo posible su perdurabilidad. Sin embargo, existen hipótesis basadas en los restos de cerámica, que indican la existencia de asentamientos aledaños a estas grandes ciudades que eran construidos con materiales poco perdurables, estos asentamientos rurales, estaban constituidos por personas del mismo estrato social (Vázquez López, 2008; Domínguez-Carrasco y Folan, 2010).

La existencia de asentamientos rurales entonces tendría grandes implicaciones ya que muestra un nivel social complejo y una tradición de concentración tipo urbana. Por ejemplo, Willey (1956) propone tres tipos de configuración de barrios urbanos aledaños a los centros urbanos, a) dispersos a través del espacio sin importar que tan cerca o lejos estén de los centros, b) concentrados alrededor de los centros y c) Concentrados alrededor de los centros y con unidades intermedias entre los centros y los asentamientos de menor tamaño (Smith, 2011).

El área de Calakmul fue dividida en, área nuclear, vecinal, periférica, rural próxima y rural distante (Geovannini y Martínez-Dávila, 2008). El área periférica de Calakmul se encontraba en el Bajo el Laberinto al oeste, norte y este; en la meseta al sureste con elevaciones graduales mayores de 250 msnm y,

por último, el corriental, una corriente semi-permanente que rodea casi todo el promontorio. Teniendo en cuenta estos límites, la extensión de la zona nuclear, área vecinal y periféricas del sitio abarca 17.27 km^2 . Dentro del patrón de asentamiento es notable una mayor dispersión conforme las construcciones se alejan de la zona nuclear (Demarest *et al.*, 2005).

3.2.3. Población

Existen diversas y variadas estimaciones acerca de la densidad poblacional que los mayas pudieron tener. Se basan en métodos arqueológicos de conteo. Por ejemplo, Sanders *et al.* (1968) cuentan las unidades residenciales que se piensa fueron contemporáneas entre si y las multiplican por el tamaño promedio de una familia (generalmente 4 o 5.6 para la península de Yucatán). Durante la excavación se hace la estimación del número de habitantes, este número de habitantes es asociado con la ocupación de la estructura, que normalmente tiene un rango de 5 a 8.3 habitantes por estructura, utilizando una constante del espacio del piso de la vivienda por persona (Naroll, 1962), se obtuvo un promedio de 5.4 habitantes por estructura para las estructuras de la ciudad de Tikal.

Existen otro enfoque de estimaciones, basadas en la capacidad de carga del cultivo R-T-Q para la tierra circundante. Con un ciclo itinerante de 7 años (3 años de cultivos, 4 años de barbecho) y en la que 0.5 hectáreas de tierra puede sostener un individuo durante un año (Conklin, 1961). Esta técnica fue utilizada para el Río Bec Maya por Demarest y Rice (2005); donde estratifican la población y contemplan que las personas que vivían en campo eran más que las que se encontraban en las ciudades. Por tal motivo se estima que durante el Clásico Terminal la población de la ciudad del Reino de Calakmul era 50,000 personas, y que podría existir 96.6 hab/ km^2 en 20 pueblos secundarios aprox. 200,000 hab. y en la población rural 1.5 millones de personas, estimando un total de 1.75 millones de habitantes en los 13, 000 km^2 , de Calakmul (Folan *et al.*, 1995).

Las estimaciones de la densidad poblacional entonces se pueden realizar conociendo la cantidad de estructuras y montículos encontrados en un área con trabajos de arqueología y por la capacidad de los sistemas ambientales para cubrir los requerimientos de la población. La estimación de la cantidad y densidad de estructuras residenciales tienen dos fuentes de ambigüedad; las casas ocultas y la función de la estructura, ya que puede ser diferente de la que originalmente se piensa. Las estimaciones basadas en la capacidad de carga dependen de variables ambientales que pudieron cambiar en el tiempo para las cuales no contamos con suficiente información.

Por lo anterior podemos observar que existen contrastantes estimaciones acerca de la densidad poblacional del área Maya y por lo cual se deben de tomar con cautela. En la región de Calakmul, se cree que la densidad aumentó de 11 hab/ km^2 , en 300 D.C. a un máximo de 117 a 151 hab/ km^2 500 años más tarde (Hodell *et al.*, 1995). La superficie de las tierras agrícolas ocupadas por la población de Río Bec

era del 75 % del total del área que se cree le pertenecía, y se sugieren poblaciones rurales con densidades entre 40 y 200 personas por km^2 (Willey, 1956) y en los centros urbanos de 600 a 700 personas por km^2 (Haviland, 1970). El uso de cultivo intensivo de las tierras bajas centrales abre la posibilidad de áreas densamente pobladas de 73 a 220 hab/ km^2 para la zona en el centro de Río Bec (Adams, 1980). En la zona de Calakmul en el Clásico existían densidades poblacionales de 28 a 85 hab/ km^2 . A continuación se presenta una tabla de las densidades poblacionales encontradas en la literatura para el periodo Clásico para las tierras bajas mayas y Calakmul (Tabla 3-1).

Tabla 3-1: Estimaciones de densidad poblacional.

Densidad hab/ km^2	Ubicación	Periodo	Autores
600-700	Tikal periferia	Clásico	Haviland (1970)
635	Tikal núcleo	Clásico	Ashmore <i>et al.</i> (1984)
500	Calakmul	Clásico	Folan et al. (2001)
300	Tikal núcleo	Clásico	Haviland (1970)
400	Tikal núcleo	Clásico	William Sanders (1968)
210.5	Yaxha-Sacnab	Clásico Terminal	Rice (1978)
200	Tikal núcleo	Clásico	William Sanders (1968)
73-220	Río Bec	Clásico Terminal	Willey (1956)
175	Calakmul	Clásico Terminal	Turner (1990)
77	Tikal núcleo	Clásico	Harrison (1977)
25	Península de Yucatán	Clásico	Faust (2001)

3.2.4. Sistemas agrícolas, alimentación y uso de los recursos

Existen hipótesis que indican que existían diversos tipos de agricultura y que las personas ocupaban dos terceras partes de su tiempo en labores agrícolas. La técnica “Roza-Tumba-Quema” (R-T-Q) es una de ellas, caracterizada por cortar y quemar el monte antes de sembrar. Por mucho tiempo, se creyó que este tipo de agricultura fue el único que satisfacía los requerimientos de la población Maya. Sin embargo, en estudios recientes existe mayor aceptación de que los mayas pudieron haber usado otros métodos agrícolas en conjunto con la R-T-Q. Ejemplos de ello son las terrazas, los campos elevados o camellones, la agricultura de riego, el bosque artificial, la agricultura traspatio y el uso del acolchado (Dunning y Beach, 2000) (Tabla 3-2). La agricultura intensiva se define aquí como cualquier modo de cultivo en el que la frecuencia de los cultivos por unidad de tierra supera la frecuencia de barbecho ó descanso. En el caso de la agricultura R-T-Q que es una practicada tradicionalmente por los mayas la frecuencia de barbecho excede la frecuencia de cultivo (agricultura extensiva), sin embargo, cuando se acorta el tiempo de barbecho esta puede considerarse una forma intensiva de R-T-Q (Turner II, 1974).

Algunos investigadores consideran imposible que los mayas hubieran podido construir centenares de

centros ceremoniales, con miles de edificios, dentro de un sistema económico basado sobre el cultivo de R-T-Q y concluyen que solo una sociedad que utilizaba recursos hidráulicos y cultivo intensivo podía alcanzar tal nivel de civilización (Domínguez y Folan, 1996). En el área, la ausencia de ríos y la extrema porosidad del suelo vuelven casi imposible la irrigación artificial, aunque es cierto que, mediante fotografías aéreas, se han localizado canales conectados con el río Candelaria, y otro que une el curso superior del río Champotón al sitio de Edzná, lo que demuestra que ocasionalmente se construyeron obras hidráulicas (Lhuillier, 1981). Existen algunos registros arqueológicos acerca de agricultura intensiva dentro de las tierras bajas mayas, como la presencia de redes de riego a lo largo de Motagua y Uluá ríos de Guatemala y Honduras, respectivamente. También se han encontrado algunos registros en piedra en el sur Campeche cerca de Tuxpefia, como los diques agrícolas, presentados en diversos sectores de la región de Río Bec de Campeche, y vestigios de terrazas en las montañas mayas de Belice, así como restos de campos elevados que han sido descubiertos en las llanuras de inundación del río Candelaria, en el suroeste de Campeche y en el norte de Belice (Conklin, 1961; Siemens y Puleston, 1972). A continuación se describen los sistemas agrícolas intensivos en las tierras bajas mayas más aceptados por los arqueólogos, además de sistemas menos mencionados en la literatura especializada durante el Clásico Maya (Tabla3-2).

Terrazas

Las terrazas son un tipo de agricultura intensiva que consiste en la formación de terraplenes en desnivel, son bordos de tierra construidos perpendicular a la pendiente del terreno de entre 40-47 grados, y que son sostenidos por una pared o talud generalmente hecho de piedras calizas (Fig.3-1a). La construcción de terrazas tiene fines de mejoramiento del suelo disminuyendo la erosión y aumentando la infiltración del agua. El mayor número de laderas con terrazas en las tierras bajas mayas se encuentran al oeste de Nicolás Bravo, Quintana Roo y hacia Xpujil y eran muy bajas (5-45 cm), con suelos superficiales comunes en la región. En algunos barrancos y laderas se han encontrado diques que parecieran están estrechamente relacionados con el cauce de un canal que sirve de vertedor a las terrazas. Hacia el oeste de Becam, se han encontrado que son generalmente más pequeñas con una gran similitud a las que se encuentran al suroeste de Estados Unidos (Denevan y Turner II, 1974).

Camellones o Campos elevados

Los camellones son superficies elevadas de sembradíos con canales intermedios, comúnmente hallados en las llanuras inundadas, incluyen cualquier preparado de la tierra por encima de la superficie natural con el fin de mejorar las condiciones del cultivo (Fig.3-1b) (Denevan y Turner II, 1974). El camellón en su mayor parte está formado por materia orgánica con una superficie arable de 40 a 80 cm. Estas técnicas



Figura 3-1: Sistemas agrícolas intensivos.

agrícolas se encuentran ampliamente distribuidas por los cultivadores indígenas tropicales y de manera importante en los amerindios precolombinos. El cultivo de campos elevados mayas era llevado a cabo en tierras bajas inundadas estacionalmente donde los suelos son a menudo muy fértiles, pero pobremente drenados y permanecen inundados por tiempos prolongados, a menudo de cuatro a cinco meses, creando suelos anegados no aptos para el cultivo. Los mayas construyeron plataformas elevadas y una red de drenaje y canales, facilitando el drenaje y estableciendo una superficie seca para el cultivo por encima del nivel de agua estancada. Aparte del drenaje incluyen la mejora de la fertilidad del suelo a través de la pulverización y de la concentración de materia orgánica y capa superior del suelo, la modificación del microclima, el control de malezas, y control de erosión. La mayoría de los cultivos de raíces se generaban en los campos elevados (Turner II, 1974).

La presencia de vestigios de terrazas y campos elevados añade una nueva perspectiva a evaluar sobre la capacidad de carga de las tierras bajas centrales. Estas estructuras agrícolas son indicadores de que existían cultivos anuales o cercanos a la anualidad y un aumento de productividad. Los campos elevados son particularmente significativos, ya que su construcción hizo posible la presencia de cultivo en las regiones inundadas en las tierras bajas centrales (Turner II, 1974).

Otros sistemas intensivos

La arboricultura también parece haber sido un importante proveedor de recursos. En particular el ramón (*Brosimum alicastrum*) es un árbol grande que puede producir hasta 60 kg/año y una hectárea de ramón hasta 1,242 kg anualmente. Por estas razones pudo ser un alimento importante que no requería los cuidados del maíz. En tiempo de escases los mayas obtenían harina de las frutillas de dicho árbol y por sus características era posible almacenarlo (Antoine *et al.*, 1982; Willey, 1956).

Los bosques artificiales eran generados a partir de la tala selectiva del bosque natural e imitaban los estratos arbóreos de un bosque tropical natural con árboles, arbustos y herbáceas de cultivo, favoreciendo a la conservación del suelo con especies cultivables como maíz, cacao, ramón, calabaza entre otros

(Antoine *et al.*, 1982). Mientras que el acolchado (Fig.3-1c), es la utilización de hojarasca y materia orgánica como método para fertilizar el suelo, permitiendo la disminución de temperatura en la tierra cultivada y la retención de humedad en el suelo (Zhang *et al.*, 2015).

Por último, la horticultura es la pirática de colocar cultivos entre las casas en espacios denominados (Chuumuc luúm) o sea tierra “en medio”. Sembraban aproximadamente de 3,600 km^2 de árboles frutales (ramones, ciricotes y palmas de guano). y la segunda siembra, era agricultura de tierra bajas inundable. El milpero con tornamil o segunda siembra pero más profunda que la primera entre y encima de los cuyitos (hoyos que se encuentran en el bajo) Folan *et al.* (1995).

Tabla 3-2: Prácticas agrícolas intensivas Mayas.

Tipo de práctica intensiva	Autor
Terrazas	Harrison y Turner II (1978)
Terrazas y Camellones	Harrison (1977) y Scarborough (1983)
Riego y drenaje	Siemens y Puleston (1972)
Sistemas hidráulicos	Matheny (1983)
Riego y drenaje	Pohl (1990)
Horticultura	Folan <i>et al.</i> (1995)
Segunda siembra	Folan <i>et al.</i> (1995)
Uso de aguadas y canales	Folan <i>et al.</i> (1995)

Solo se encontraron vestigios de las terrazas y los campos elevados, los otros métodos de intensificación son inferidos a partir de la evidencia encontrada en la arqueología, palinología, etnohistoria o etnografía (Harrison y Turner II, 1978).

Alimentación y uso de los recursos

La alimentación del pueblo maya, se cree era frugal y consistía básicamente de maíz, preparado en diferentes formas. Las más usuales eran las tortillas (con sal y excepcionalmente un guiso), los tamales (simples o rellenos con pedacitos de carne, frijoles u hojas de chaya), el pozol (masa medio cocida molida y disuelta en agua), el atole (masa molida, diluida en agua y cocida, a la que podía añadirse cacao), el pinole (harina de maíz tostado disuelta en agua). Comían también frijoles, calabazas, chayotes, camotes, chaya, tomates, yucas, jícamas, macal. Recolectaban frutos de numerosos árboles y arbustos: mamey, chicozapote, zapote blanco, aguacate, guayaba, guaya, nanche, pitaya, ciricote, marañon, anona, ciruela, uva silvestre (Lhuillier, 1981).

La información de los cronistas indican que no comían carne fuera de sus fiestas, aunque podían obtenerla de los productos de la caza y la pesca actividades complementarias a la agricultura, así como

la domesticación de animales como guajolotes, faisanes, palomas, perros y abejas. Es probable que los alimentos de origen animal los reservaran para los banquetes, las ofrendas rituales y la alimentación de los señores y sacerdotes. El uso de bebidas alcoholizadas de la corteza de ciertos árboles (balché) o de maíz tostado estaba restringido a las ceremonias religiosas. La carne humana no formaba parte de la dieta alimenticia; algunos jerarcas la comían como parte de un ritual, a raíz de un sacrificio (Fedick, 2012; Turner y Sabloff, 2012).

La industria artesanal era principalmente dedicadas a la alfarería, cestería, lapidaria, fabricación de objetos tallados en piedra tallada y pulida, así como tejidos (Lhuillier, 1981). Por la marcada diferenciación geográfica y ecológica de las poblaciones mayas, el comercio era una actividad recurrente, ya que los productos cultivados y bienes eran diferentes entre las poblaciones. El trueque era interno y también con los pueblos del centro de México y del Golfo Atlántico, así como con los del resto de América Central. Yucatán exportaba principalmente sal, miel, cera, pescado (secos, salados o asados), algodón y mantas del mismo material, henequén, pedernal, copal, plumas de aves acuáticas. Guatemala exportaba maderas preciosas, pieles, algodón plumas de quetzal, liquidámbar, jade, turquesa, piedra volcánica para la fabricación de metates, polvo volcánico usado en cerámica como desgrasante (Lhuillier, 1981; Domínguez-Carrasco y Folan, 1996).

Los Chultunes

El término chultun proviene del idioma maya yucateco, que significa aljibe o cisterna para contener agua de lluvia. Chulub es un término utilizado para “agua de lluvia” y tun “piedra labrada”, por lo que algunos autores sugieren que solamente los depósitos que hayan sido utilizados con ésta función pueden llamarse chultunes. Sin embargo, la palabra chultun se utiliza como un término genérico para nombrar a todos los depósitos subterráneos de origen prehispánico tallados en caliza. Los chultunes (Fig.3-2) son cavidades subterráneas, sus entradas se encuentran a nivel del suelo, son excavados directamente en la roca caliza en forma de botellones, campanas, bóvedas, de doble cámara y algunos amorfos. Construidas esencialmente como sistemas de almacenamiento de agua y alimentos, especialmente en tiempos en el que escasean los recursos (Hermes *et al.*, 2005).

Los chultones se han clasificado de acuerdo a su tamaño, formas y ubicación, y se cree que hay una alta relación entre la presencia de chultunes y su potencial de almacenamiento con la agricultura de árboles frutales como el ramón sobre todo para el periodo Clásico Maya (Dunning y Beach, 2000).

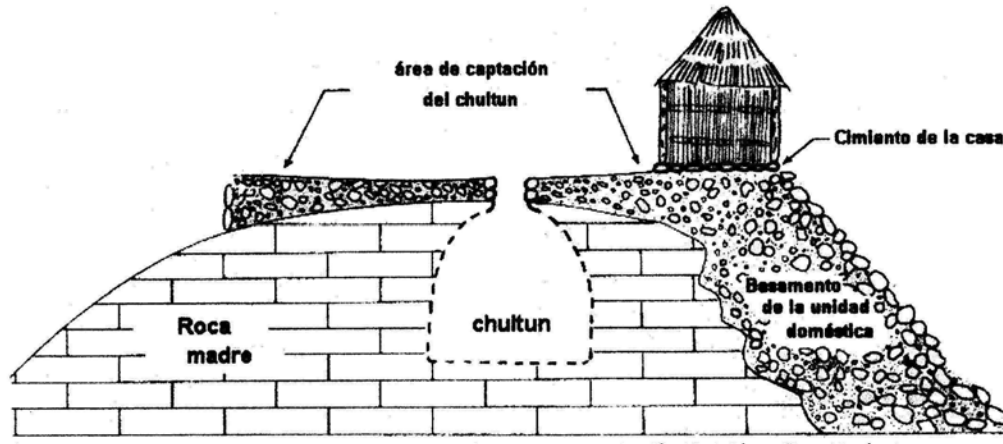


Figura 3-2: Conformación de un Chultun según Gallareta-Negrón (2000).

3.3. Área de estudio

El área Maya para algunos investigadores, abarca un territorio de aproximadamente 400, 000 km^2 y corresponde hoy a los estados mexicanos de Yucatán, Campeche, Quintana Roo, gran parte de Tabasco, la mitad de Chiapas, así como parte de la República de Guatemala, Belice y los extremos occidentales de Honduras y El Salvador (Fig.3-3) (Peterson y Haug, 2005; Folan *et al.*, 2015).

Este territorio ha sido dividido por sus características geográficas en tres áreas meridional, central y septentrional. Calakmul se encuentra en el área central, y constituye la ciudad más importante en el reino maya de las tierras bajas (zona comprendida actualmente por Tabasco, parte de Guatemala, la Península de Yucatán y gran parte Honduras), para el periodo Clásico, formando uno de los grandes centros regionales (Lhuillier, 1981; Folan *et al.*, 2015). Actualmente está situada en la parte sureste del estado de Campeche. Esta Ciudad Estado está constituida por tierras de poca elevación atravesadas de oeste a este por cadenas de colinas. Solo la recorren tres pequeños ríos: Champotón, Lagartos y Xel-há; tiene pocos lagos y lagunas naturales (Lhuillier, 1981).

El área de estudio fue delimitada a partir de la literatura arqueológica sobre esta zona, que sugiere que Calakmul fue considerada como capital de un estado regional durante el periodo Clásico. Esto se infiere a partir de la distribución del glifo emblema (Fig.3-4) y otros restos etnográficos que denotan su importancia como capital del estado regional de Calakmul indicando relaciones diplomáticas con otras ciudades (Domínguez-Carrasco y Folan Higgins, 1998). La delimitación del estado regional de Calakmul según Folan *et al.* (2009) se basa en un modelo de polígonos de thiesen generado por Marcus (1973), este modelo muestran la influencia de las grandes ciudades sobre otras de menor tamaño. Si bien en estos límites se encuentran incluidos sitios que corresponden actualmente al Petén Guatemalteco, el



Figura 3-3: Área de la Civilización Maya del Clásico (Gallareta-Negrón, 2000). *Elaboración propia.*

área de estudio que delimitamos en esta investigación solo incluye la porción del Estado Regional de Calakmul que pertenece a México, debido a que no tenemos acceso a la información cartográfica actual de Guatemala. Finalmente, la capital o ciudad de Calakmul es considerada con una superficie de 30 km^2 y el área del estado regional y/o Reino de Calakmul 13, 000 km^2 y nuestra área de estudio tiene una superficie de 19, 800 km^2 englobando el estado regional y la zona periférica (Fig.3-5) (Domínguez-Carrasco y Folan Higgins, 1998; Folan *et al.*, 2009).



Figura 3-4: Glifo Emblema de Calakmul según Marcus (1973) (Folan *et al.*, 2009).

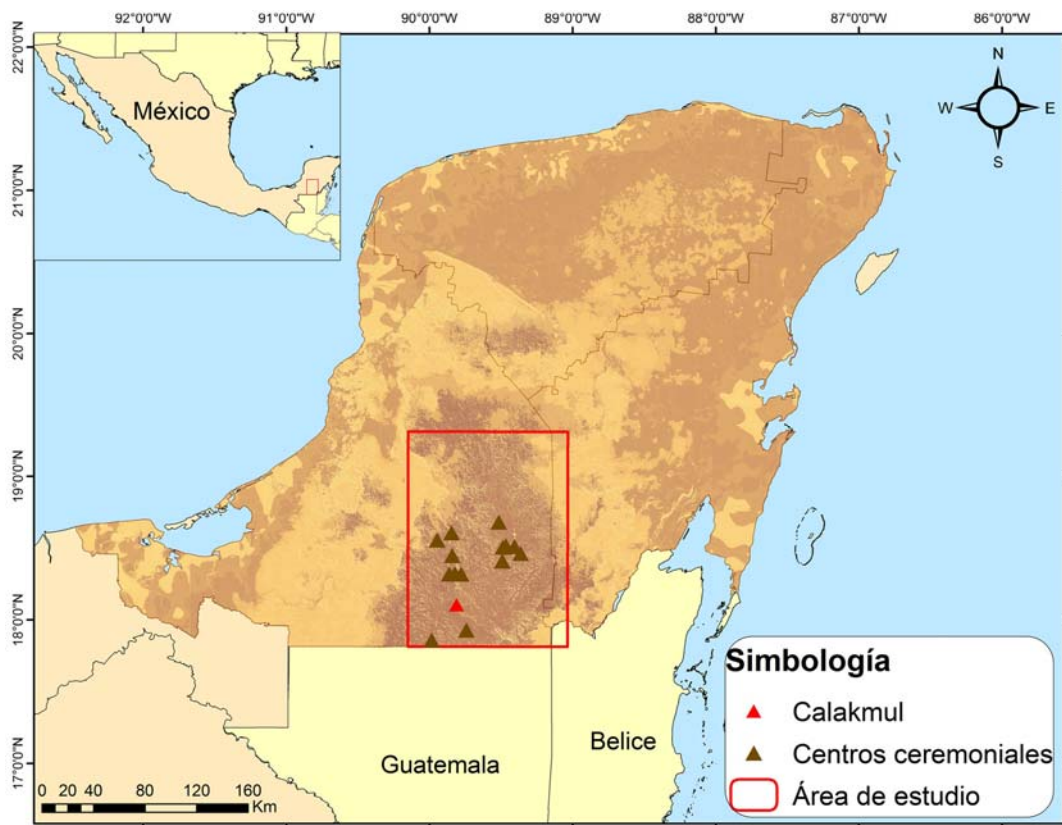


Figura 3-5: Ubicación del área de estudio.

3.3.1. Descripción física del área de estudio

El área de estudio está situada en el centro de la península de Yucatán, se caracteriza por una meseta central (meseta de Zoh-Laguna) y lomeríos kársticos, productos de la disolución de la roca caliza contando con las principales elevaciones del área baja Maya. El clima actual en la región es subhúmedo con lluvias en verano (entre junio y noviembre). La temperatura promedio anual es de 24.6°C y el promedio de precipitación anual es de 1076.2 mm (Aw_1 y Aw_2) (García de Miranda y García, 1973) y presenta un gradiente de precipitación de sureste al noroeste. En la zona predominan los Leptosoles, poco profundos (aprox. 25 cm) y limitados con roca dura y continua. Los suelos del área maya se caracterizan por ser calizos, lo que los hace relativamente fáciles de trabajar (Martínez y Leal, 2002; Villalobos-Zapata y Mendoza Vega, 2010).

A pesar del escaso relieve topográfico de la zona existen diferencias de elevación de 100 a 300 metros sobre el nivel del mar (msnm), la vegetación presenta dos tipos de bosques naturales principales: los “bajos”, que son bosques en humedales estacionales que poseen suelos de arcilla profunda y selvas de tierras altas en terreno bien drenado (Pérez-Salicrup y Foster, 2000). En general la selva se encuentra en terreno cársico principalmente somero, menos ácido, y con abundante afloramiento de calcio, reduciendo la disponibilidad del agua y acentúa la sensibilidad de las plantas a las sequías estacionales (Martínez y Leal, 2002). Existe un gradiente de precipitación sudeste-noroeste atraviesa la región, marcado por diferencias significativas en la precipitación anual total (1400 a 900 mm) y en la duración e intensidad de la estación seca invernal. Dada a una alta evapotranspiración, existen pocas fuentes permanentes de agua superficial y fuentes de agua subterránea a profundidades superiores a 150-200 m (Turner *et al.*, 2001).

Los “bajos” son especialmente importantes durante la época de secas ya que durante la época de lluvias el agua se deposita naturalmente en ellos y almacenan agua que permanece hasta la temporada de sequía. En los bajos podemos encontrar formaciones de procedencia antrópica llamadas “aguadas”, estas formaciones tienen un fondo principalmente arcilloso por lo que son buenas captadoras de agua de lluvia. Los registros paleoecológicos indican que muchas aguadas tienen retrabajamiento antropogénico del sedimento para mejorar su impermeabilidad (Zamora, 1978).

3.3.2. Suelos del área de estudio

Existen pocos estudios de paleosuelos en el área Maya, y en especial en el área de estudio, debido a la dificultad que implica generar datos, ya que el suelo contiene características cársicas presentando alta disolución, además de registrar un fuerte impacto de la actividad humana que iniciaron desde el Formativo Temprano. En los pocos estudios realizados se han encontrado secuencias de suelos en el

sedimento aluvial de Gleysoles con un fuerte grado de degradación, ya que a lo largo de la sedimentación es posible observar pérdidas (Vázquez *et al.*, 2016). También ha sido posible observar en el registro de paleosuelos un periodo de inestabilidad durante el Clásico Tardío y Posclásico (Solís-Castillo *et al.*, 2014).

Debido a la falta de datos para generar un mapa de suelos del periodo del Clásico en el área de estudio y la similitud del suelo actual con los pocos paleosuelos encontrados. Se utilizó un mapa actual de suelos, obtenido del Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad del año 1995 (Fig.3-6) (INIFAP-CONABIO, 1995).

A continuación se hace una breve descripción de los suelos encontrados en el área de estudio (Fig.3-6). Los Gleysoles son suelos pantanosos con mal drenaje, medianamente profundos y con poca erosión, este tipo de suelo es especialmente apto para cultivar hortalizas y maíz. Las rendzinas son suelos someros y pedregosos, son generalmente fértiles y mantiene buenos rendimientos de maíz. Los vertisoles son suelos arcillosos que sufren grandes cambios de volumen con las variaciones de humedad, las arcillas absorben gran volumen de agua y crean altas presiones provocando movimientos de material que producen una mezcla continua del suelo por lo que los horizontes no se desarrollan de forma claramente diferenciado, estos suelos son excelentes para cultivo de temporal (FAO, 2009a; IUSS-WRB, 2007).

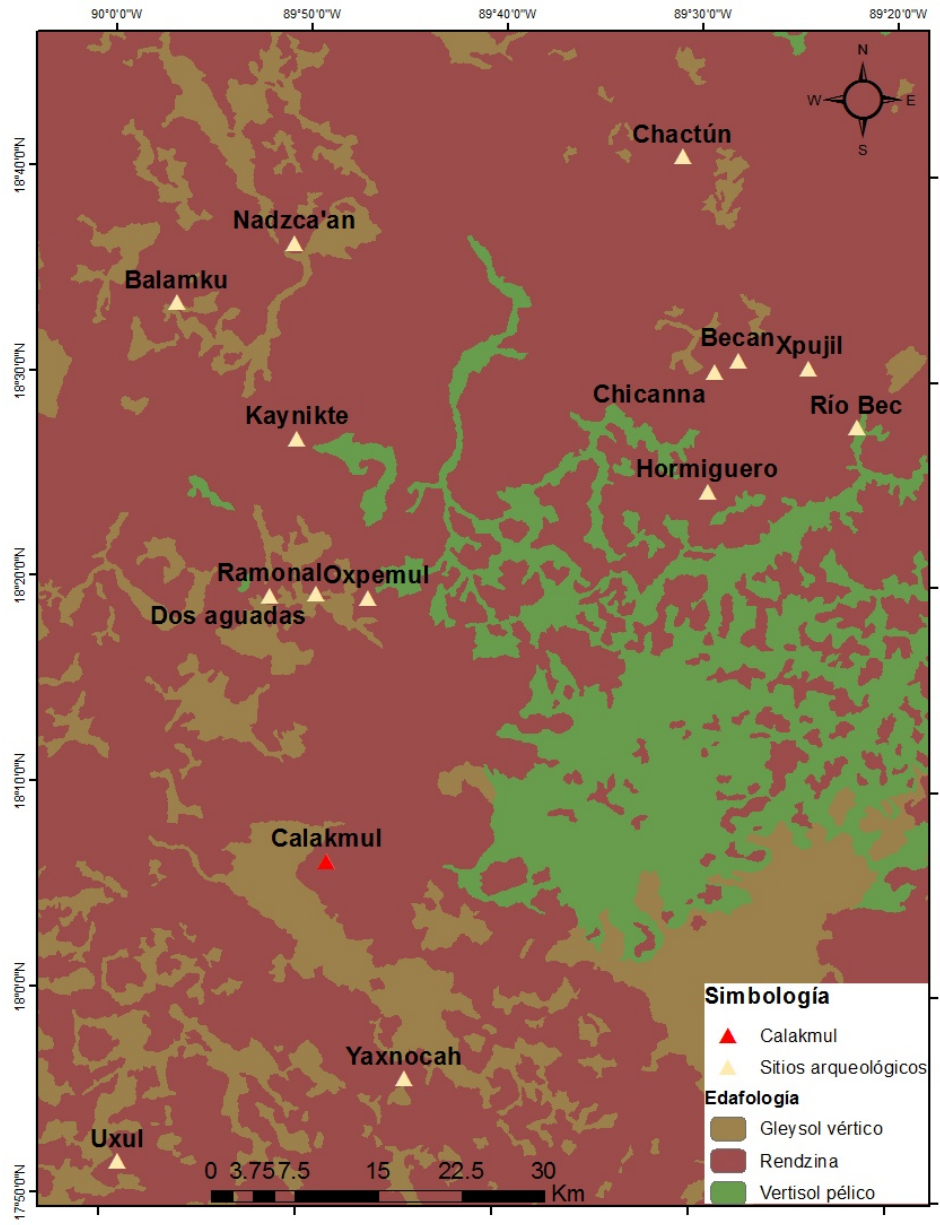


Figura 3-6: Suelos en el área de estudio.

3.4. Objetivo

Modelar la evolución del paisaje con base en diferentes escenarios de densidad poblacional y sistemas agrícolas en Calakmul durante el Clásico Terminal.

3.4.1. Objetivos específicos

1. Modelar cambios plausibles de los atributos del paisaje basados en escenarios agrícolas de R-T-Q y sistemas intensivos en combinación con diferentes densidades de la población y la distribución de los asentamientos.
2. Corroborar los paisajes simulados a través de datos paleoecológicos.
3. Evaluar el aporte de los modelos a la comprensión de procesos ambientales históricos.

3.5. Materiales y Métodos

Se utilizó el programa de análisis estadístico R para la elaboración de las gráficas y algunos análisis básicos. Se emplearon los sistemas de información geográfica ArcGIS, IDRISI y Q-GIS para la elaboración de los datos geográficos. Desarrollamos el modelo en el programa computacional DINAMICA EGO (<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>).

Los insumos utilizados en el modelo de cambio de cobertura y uso del suelo prehispánico, fueron obtenidos de la literatura arqueológica y el registro paleoecológico de la zona. Estos datos describen la población, el clima y las prácticas agrícolas del pueblo Maya y permitieron implementar conocimiento experto en el modelo. Otros insumos fueron los mapas actuales de las condiciones físicas del terreno utilizando el actualismo geológico (Lyell, 1835), se usó el modelo digital de elevación, a través del cual, elaboramos el mapa de pendiente y el mapa edafológico (Fig.3-6). Se elaboraron también mapas a) de producción agrícola potencial (FAO, 2014) , b) de erosionabilidad con base en el mapa edafológico, y c) de distribución de asentamientos humanos con información arqueológica combinado con el modelo de distribución potencial de asentamientos humanos que describe a continuación. También se generó un mapa de precipitación para cada año desde el año 800 al 950 D.C. a partir de los datos de precipitación de Medina-Elizalde *et al.* (2012).

3.5.1. Modelo *CCUS Calakmul*

El modelo considera los requerimientos calóricos de los individuos y los datos de precipitación reconstruidos, un porcentaje de la producción es utilizada como reserva (FAO, 2014), definiendo cuanto

producir cada año. El modelo estima la producción agrícola en el área de los escenarios de distribución de los asentamientos, y simula espacialmente el establecimiento y el abandono de milpas emulando un sistema tradicional de R-T-Q con ciclos itinerantes de cultivo y descanso (Fig.3-7). Posteriormente implementamos la simulación de sistemas intensivos dentro de los bajos, para suplir los requerimientos de la población de Calakmul en caso de que la densidad poblacional aumente y el sistema R-T-Q no fuese suficiente. El tiempo de ocupación es durante el Clásico Terminal, sin embargo el modelo simula los últimos 400 años, asemejando un proceso de ocupación natural. El resultado es una serie de mapas anuales que representan las áreas cultivadas, así como la producción obtenida cada año y que finalmente suple o no las necesidades de la población, el modelo fue acoplado a dos modelos más uno que simula el establecimiento de los asentamientos mayas en el área de Calakmul y el otro que simula el efecto de la sequía en la producción agrícola generada por el modelo sistemas agrícolas (Fig. 3-8).

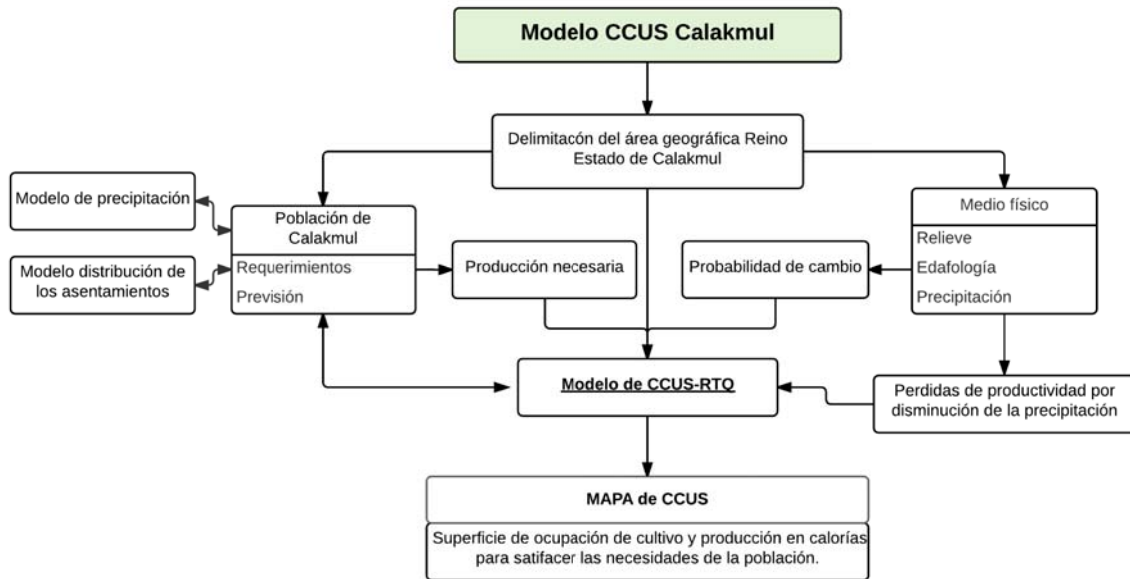


Figura 3-7: Esquema general del modelo de CCUS-Calakmul.

3.5.2. Modelo *Sistemas agrícolas*

Este modelo fue descrito en el capítulo anterior, y simula los CCUS en un paisaje en el cual se practica la R-T-Q y sistemas agrícolas intensivos. Está integrado de submodelos (Fig 3-8). El modelo funciona de forma iterativa con mapas en formato raster. A cada celda, se les asigna de forma dinámica valores y atributos del terreno de acuerdo a los requerimientos del modelo.

El modelo inicialmente simula el establecimiento y el abandono de milpas emulando un sistema

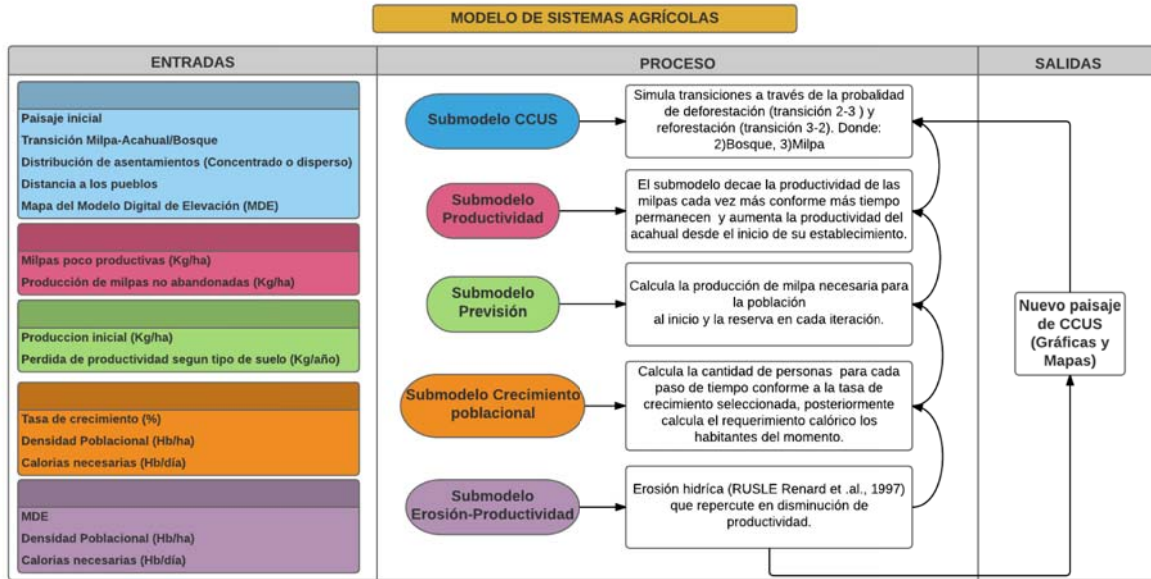


Figura 3-8: Esquema general del modelo Sistemas agrícolas.

tradicional de R-T-Q. El área cultivada depende del requerimiento calórico de la población y la locación de los cultivos, depende de las condiciones ambientales (aptitud del suelo y pendiente) y de la distancia a los asentamientos humanos. El modelo simula la pérdida de productividad a lo largo de la duración del cultivo, el abandono por falta de rendimiento, y el establecimiento del acahual. El modelo simula entonces la recuperación de la fertilidad del suelo de los acahuales. Simula también el crecimiento de la población, si la producción suple los requerimientos de ésta. Cuando el requerimiento calórico aumenta debido al crecimiento de la población, el modelo simula la abertura de nuevos espacios para establecer cultivos y eventualmente intensifica el ciclo de cultivo o simula el establecimiento de cultivos en sitios menos propicios.

A partir de los datos arqueológicos el modelo fue modificado para generar escenarios con agricultura intensiva, modificamos el modelo R-T-Q, y se le asignó productividad a los bajos en el caso de los escenarios con agricultura en bajos. Posteriormente para simular el acolchado asignamos productividad constante a lo largo del tiempo en las milpas establecidas por el modelo del sistema tradicional R-T-Q.

3.5.3. Distribución de asentamientos Mayas en el área de estudio

La distribución de los pueblos o barrios mayas se basó en datos georeferenciados de los asentamientos arqueológicos ceremoniales encontrados para el clásico tardío en el área de Calakmul y en las características preferenciales medio ambientales que pueden influir en la probabilidad del establecimiento de un asentamiento.

Para ello ubicamos geográficamente los siguientes centros urbanos en la región de Calakmul (Fig.3-5): Calakmul, Uxul, Yaxnocah, Dos aguadas, Oxpemul, Ramonal, Balamku, Nadzca'an, Chicanna, Becan, Xpujil, Chactún, Hormiguero, Río Bec, Kaynikte, estos sitios se sabe convivieron en espacio y tiempo (Domínguez-Carrasco y Folan, 2010, 1996; Domínguez-Carrasco y Folan Higgins, 2015).

A partir de la localización de los centros antes mencionados generamos un modelo de distribución potencial de la población Maya mediante el algoritmo MaxEnt. MaxEnt es el acrónimo de máxima entropía, un método de estadística bayesiana que estima las distribuciones de probabilidad de datos de presencia y/o ocurrencia. La distribución de individuos de una especie sujeta a restricciones dadas por la información ambiental combinado permite generar una probabilidad potencial de distribución geográfica (Phillips *et al.*, 2006). Este modelo utilizó datos de entrenamiento (ubicación de ocurrencia de los centros urbanos) y variables medioambientales (tipo de suelo, elevación (MDE), distancia a akalché (bajos), distancia a aguadas (zonas de retención de agua), distancia a corrientes de agua y pendiente) con los cuales, generó el mapa de probabilidad de ocupación (Phillips *et al.*, 2006), utilizada para determinar los lugares más propicios para el establecimiento de asentamientos humanos (Fig.3-12).

Con la probabilidad obtenida en MaxEnt generamos tres escenarios para distribuir 100 sitios a una distancia mínima de 2 km entre ellos. En el primer escenario de distribución denominado “ Distribución de asentamientos dispersos”, solo se utilizó el mapa de probabilidad de Maxent. Posteriormente se utilizó un segundo modelo elaborado en DINAMICA, para ubicar los 100 sitios al azar en el área probable.

Los otros dos tipos de distribuciones se generaron tomando en cuenta el mapa de probabilidad en combinación con un mapa de distancias a los centros urbanos asignando peso a la distancia a los centros para generar distribuciones más o menos concentrados alrededor de los centros. Esto se realizó a través de la ponderación de la distancia como valor de decaimiento, cuando la distancia es mayor a 8 km entonces la probabilidad de que un asentamiento se establezca disminuye a la mitad (Fig.3-1). La segunda distribución “ Asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros urbanos” utilizó un peso en la distancia de 0.8 por lo tanto resultó un mapa con asentamientos muy concentrados a los centros. La tercera distribución “ Asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros urbanos” utilizó un peso en la distancia de 0.4 por lo tanto resultó un mapa con asentamientos muy dispersos a los centros, muy semejante al mapa sin centros.

$$P = Exp^{(d/(8000/\ln^2))} \quad (3-1)$$

donde P = Probabilidad en función de la distancia y d = Distancia en metros.

3.5.4. Generación de los datos de precipitación y déficit de producción

La precipitación en el área de estudio durante el período Clásico Terminal forma parte de los insumos del modelo CCUS de Calakmul. La precipitación fue obtenida con la información inferida de Medina-Elizalde *et al.* (2012), quienes estimaron las sequías en la península de Yucatán en el Clásico, a través isotopos de oxígeno 18 encontrado en estalagmitas. Los registros presentan alta resolución temporal y datos puntuales de precipitación del pasado, mostrando la variabilidad de la precipitación en el tiempo y las condiciones climáticas que prevalecieron en la zona durante los pasados 1500 años.

El primer paso generar la variabilidad espacial para el área de estudio, a través de un mapa de distribución espacial del patrón de precipitación en la actualidad. Este mapa se realizó usando los análogos actuales de los promedios de precipitación en mm de 1910 a 2009 D.C. (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014). Posteriormente el mapa de variabilidad espacial de la precipitación fue usado como insumo en un modelo que obtiene un mapa de precipitación anual durante el Clásico Terminal Maya, contemplando que la variabilidad espacial permanece en el tiempo (Fig.3-9). EL modelo toma los valores de precipitación de cada año obtenidos por Medina-Elizalde *et al.* (2012) y es multiplicado por los valores del mapa del patrón de distribución espacial de precipitación a partir del año 800 al 900 D.C, resultando un mapa para cada año que contiene la variabilidad espacial de la precipitación en el área.

La precipitación media anual obtenida fue de 814 mm, por lo que debajo de ese umbral de precipitación el modelo de sistemas agrícolas simula un déficit en la producción de maíz. El déficit en la producción de maíz es un porcentaje de decaimiento de producción obtenido por García Boria (2015) quien menciona que por cada 100 mm de pérdida de lluvia anual el rendimiento de maíz disminuye un aproximadamente de 16 a 18 %. Esta hipótesis surge de la idea de que la cantidad de lluvia que deja de caer limita los rendimientos agrícolas. El modelo simula la escasez de precipitación interpretada como sequía y el agua como recurso que limita la producción (De la Casa, 1992; García Boria, 2015).

3.5.5. Características del suelo

El mapa de suelos se utilizó de dos maneras (Fig.3-6); primero en el modelo de sistemas agrícolas para determinar el rendimiento del maíz en función de la fertilidad del suelo presente en la zona, donde los valores se asignaron de acuerdo a la productividad media que cada tipo de suelo presente en la zona de estudio puede generar (FAO, 2009a). Y segundo en el submodelo de erosión, donde se calculó un coeficiente de erosión dependiendo de la profundidad y textura del suelo, donde entre más fino el grano menor es el coeficiente que ese suelo tendrá (Roffe *et al.*, 2004).

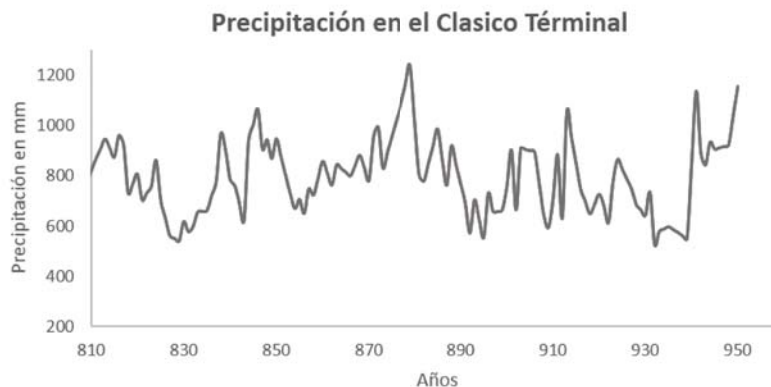


Figura 3-9: Precipitación anual desde 810 - 950 D.C. por Medina-Elizalde *et al.* (2012).

3.5.6. Análisis de polen fósil

El polen tiene una morfología característica de tal manera que es posible distinguir tipos polínicos (Se entiende por tipo polínico el conjunto de caracteres morfológicos que presentan los granos de polen y que son una combinación única, que los hace distinguibles e identificables al microscopio óptico pudiendo ser agrupados en familias). A través del recuento de estos tipos polínicos es posible inferir la estructura y la composición de la vegetación del pasado, así como elementos de cultivo y disturbio (Estévez y Pajón, 2006). La paleopalínología (estudio de los granos de polen y esporas fósil) es eficaz en la reconstrucción de paleoambientes de los yacimientos arqueológicos, haciendo posible inferir paleoclimas y eventos climáticos, como la ocurrencia de sequías. Para los arqueólogos el principal interés en la paleopalínología es de tipo local o extralocal, que delimitan la intensidad de las actividades antrópicas a través del registro del polen fósil.

En algunas regiones de la zona Maya se han realizado diversos estudios paleoecológicos, que corroboran la presencia de actividades agrícolas desde el Preclásico hasta el Clásico Tardío (Wahl *et al.*, 2007; Beach *et al.*, 2009; Carrillo-Bastos *et al.*, 2010; Kennett y Beach, 2013; Lentz *et al.*, 2014; Torrescano-Valle y Islebe, 2015). Sin embargo, para nuestra área de estudio la evidencia paleopalínológica de la actividad agrícola durante el Clásico Tardío se realizó con ayuda del equipo de la Dra. Nuria Torrescano Valle en el Departamento de Conservación de la Biodiversidad, en ECOSUR-Chetumal. La obtención de las muestras de sedimentos se realizó con un nucleador tipo Ruso en tres aguadas de la periferia del sitio arqueológico de Calakmul y muestras previamente realizadas en el área de estudio en la Laguna Chumpich y Aguada Oxpemul (Fig.3-10).

Las muestras colectadas fueron transportadas a laboratorio, para la extracción del polen. La extracción de polen fósil se realizó a través del método químico estándar (Faegri *et al.*, 1989) con ácido

clorhídrico (HCL), para la eliminación de carbonatos, hidróxido de potasio (KOH) para la eliminación de ácidos húmicos, bromuro de zinc (BrZn) para separar los granos de polen por flotación (NAKAGAWA *et al.*, 1998), finalmente se realizó la acetólisis para la eliminación de protoplasma (Moore *et al.*, 1991). Se utilizó como marcador exótico esporas de *Lycopodium* para determinar la concentración de polen (Roberts, 1998). La identificación se realizó por medio de microscopía óptica utilizando como referencia literatura (Palacios-Chávez *et al.*, 1991; Roubik *et al.*, 1991) y la colección de polen del herbario ECOSUR-Chetumal. A través de la suma de polen fue posible obtener la abundancia relativa de la vegetación expresada en porcentajes y también se determinaron los taxones para cada tipo de vegetación, incluidos bosques tropicales y vegetación secundaria.

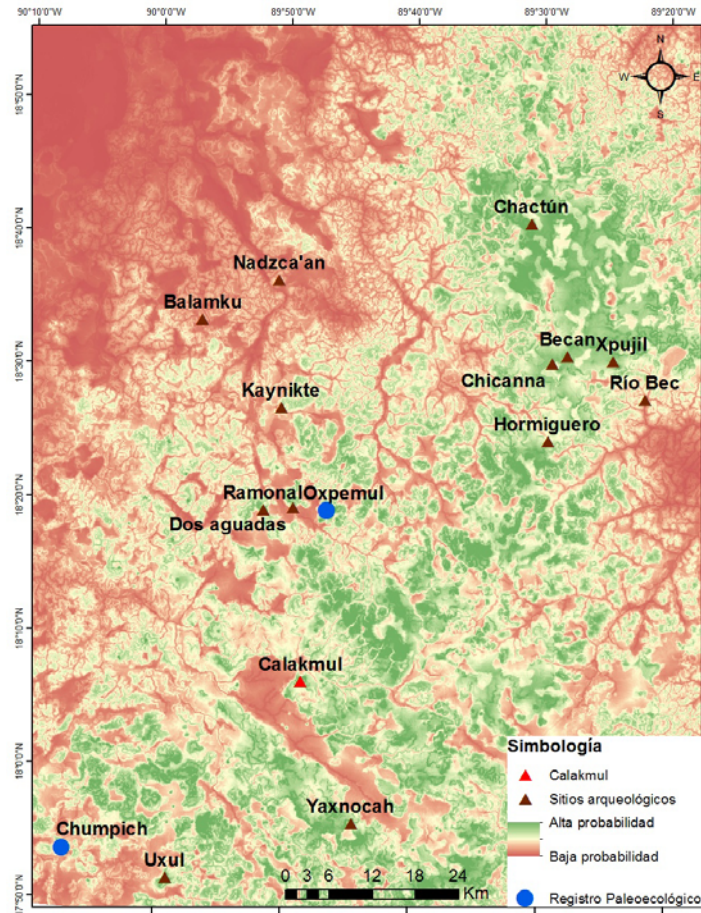


Figura 3-10: Ubicación de los núcleos de datos palinológicos.

Los datos integrados se presentaron en diagramas de polen, donde se muestran los porcentajes de los taxones generados en el software TILIA 1.17.16 (Grimm, 2011). Las zonas de polen fueron delimitadas de acuerdo con la composición y abundancia de los taxones de polen utilizando la suma incremental

de cuadrados (CONISS) en TILIA. Cuatro edades de radiocarbono (^{14}C) se obtuvieron a través de la espectrometría de masas de acelerador (AMS) de madera, restos de plantas y sedimentos orgánicos en el laboratorio Beta Analytic Inc., Miami, Florida. La calibración se realizó con el paquete Calib Radiocarbon Calibration Program 7.0.0 (Stuiver *et al.*, 2011) utilizando la curva IntCal13 (Reimer *et al.*, 2013) con intervalos de probabilidad dos. La cronología se calculó mediante regresión lineal, entre las cuatro edades calibradas y la extrapolación del modelo de regresión a través de los datos de profundidad estimando las diferentes edades en la columna. La variable dependiente fue la edad y la variable independiente la profundidad. Las tasas de sedimentación y la resolución de la muestra se calcularon sobre la base de la cronología, por lo que no se consideraron los cambios en las tasas de sedimentación fuera del rango de las edades calibradas.

3.6. Resultados

Los primeros resultados obtenidos son insumos que utilizamos en el modelo de CCUS de Calakmul, a) el coeficiente de erosión según el tipo de suelo presente en el área (Fig.3-6), b) los mapas anuales de precipitación del área de estudio (Fig.3-11) y c) los patrones de distribución de los asentamientos humanos (Fig.3-13).

3.6.1. Coeficiente de erosión

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de producción y de erosión de los suelos presentes en el área de estudio y que son utilizados en el modelo CCUS Calakmul (Tabla 3-3). El tipo de suelo proviene de la clasificación de FAO (2009a). La profundidad, es la profundidad media para ese tipo de suelo.

Tabla 3-3: Suelos del área de estudio.

Tipo de suelo	Profundidad	Textura	Coef. de producción	Coef. de erosión
Gleysol vértico	50 cm	Fina	0.4	0.21
Rendzina	Mayor a 25 cm	Media	0.7	0.19
Vertisol pélico	Menor a 50 cm	Fina	0.9	0.21

La textura se refiere a la proporción relativa de los diferentes tamaños de partículas minerales del suelo con un tamaño menor a 2 mm. Dividida básicamente en tres tipos; gruesa con 18 % de arcilla y más del 65 % de arena, media con menos del 35 % de arcilla y menos del 65 % de arena y fina con más del 35 % de arcilla. La ponderación de la producción y la erosión en el área de estudio se realizó a través de coeficientes.

3.6.2. Datos de precipitación y déficit de producción

El mapa de distribución espacial de la precipitación muestra la variabilidad en el área de estudio. El resultado fue un mapa de tendencia de la precipitación (Fig.3-11) usado como mapa de referencia para reconstruir las variaciones temporales de la precipitación en el Clásico Terminal.

El mapa de precipitación de cada año obtenido, es un insumo en el modelo de CCUS Calakmul, que permite modular la producción anual. Esto quiere decir que los años son escasos de precipitación pluvial incidirá en la producción afectando la cosecha. Está relación fue establecida con base en la precipitación media óptima (900 mm anuales), definida en Medina-Elizalde *et al.* (2012).

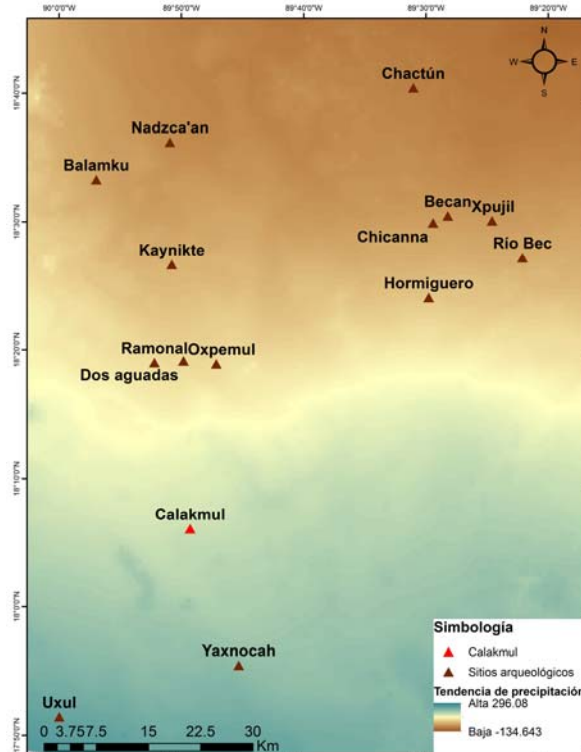


Figura 3-11: Mapa de tendencia de precipitación.

3.6.3. Distribución de los asentamientos humanos

La probabilidad de ocurrencia de un asentamiento fue obtenida a través de MaxEnt (Fig.3-12) muestra las áreas con las mejores condiciones para establecer un asentamiento humano. A partir de la distribución potencial establecimos 100 asentamientos en tres escenarios distintos. El primer escenario se basa únicamente en la probabilidad del modelo MaxEnt y muestra los asentamientos a lo largo de las probabilidades más altas “Asentamientos dispersos”(Fig.3-13a). El segundo “Asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros” (Fig.3-13b) y tercer “Asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros”(Fig.3-13c) se basan en la combinación de la probabilidad de MaxEnt y de la distancia a los centros urbanos.

Todos los escenarios simulan la colocación de los asentamientos en lugares cercanos a los bajos puesto que MaxEnt proporciona altas probabilidades en estos lugares debido a la importancia de la disponibilidad de agua.

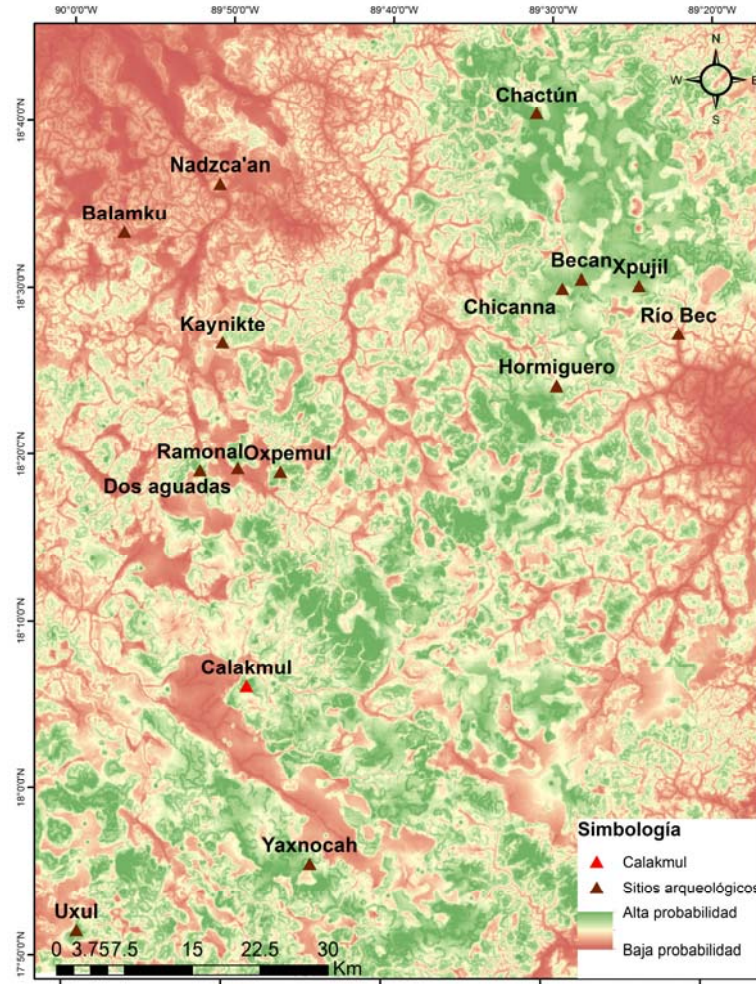
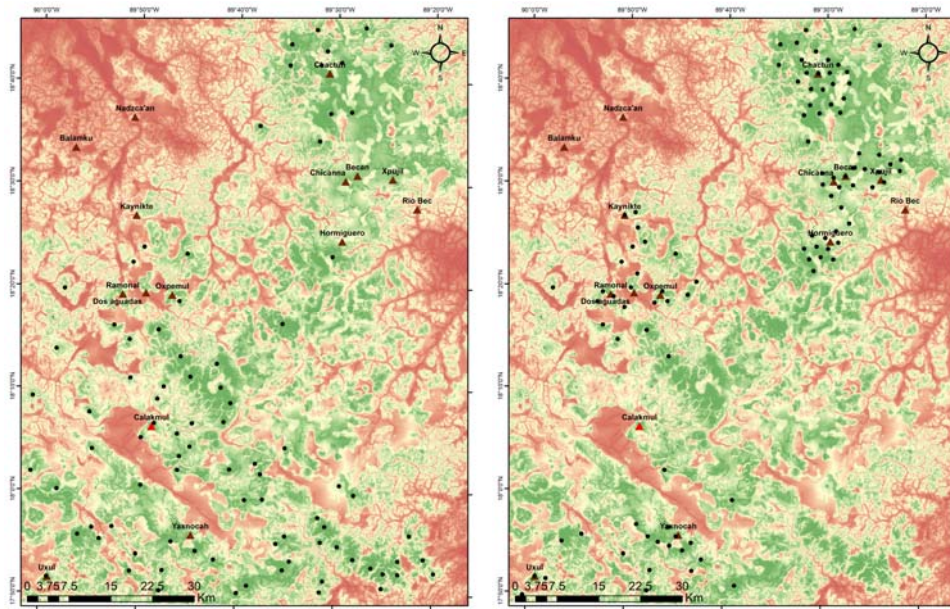
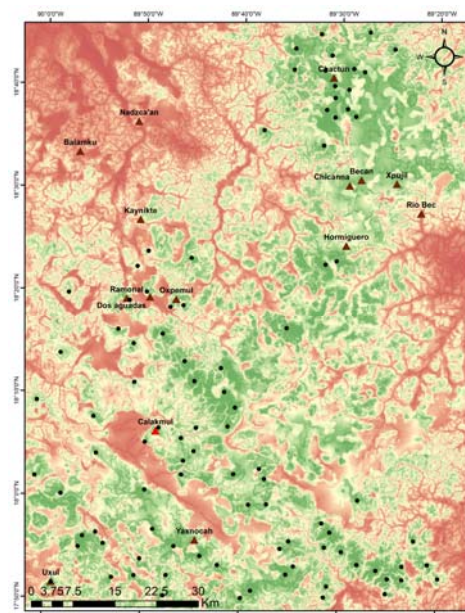


Figura 3-12: Modelo de distribución potencial de asentamientos Mayas con MaxEnt.



(a) Asentamientos dispersos.

(b) Asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros.



(c) Asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros.

Figura 3-13: Patrones de asentamiento.

3.6.4. Parámetros del modelo CCUS Calakmul

El modelo utiliza los mapas antes obtenidos para realizar la simulación de los escenarios. Los mapas de distribución de los asentamientos (Fig.3-13) sirve como base de los tres escenarios y se combinan con las densidades poblacionales y el tipo de agricultura para dar un total de nueve escenarios que combinan las teorías encontradas en la arqueología Maya del posible paisaje agrícola.

En la tabla 3-4 se muestran los parámetros usados en los escenarios de los requerimientos poblacionales. Las tres densidades usadas son 25 hab/ km^2 denominada como densidad uno (D1), 63 hab/ km^2 (densidad media D2) y 134 hab/ km^2 (densidad mayor D3). Estas densidades fueron asignadas al consensuar los registros arqueológicos obtenidos en la tabla 3-1. La menor densidad es el escenario optimista, ya que a menor cantidad de personas menor presión hay sobre los recursos fue propuesto por Faust (2001), y menciona que esta densidad es la que puede sostener la península de Yucatán con el sistema R-T-Q. Posteriormente usamos una densidad en término medio propuesto por Harrison (1977), quien propone esta densidad para Tikal durante el Clásico y finalmente la densidad mayor basada en Turner (1990) para el Clásico Terminal en Calakmul.

Tabla 3-4: Parámetros usados en los escenarios del modelo.

Parámetros	Valores utilizados
Densidades utilizadas en los escenarios.	25 hab/ km^2 , 63 hab/ km^2 , 134 hab/ km^2 .
Practicadas utilizadas en los escenarios.	R-T-Q, Intensiva en bajos, Acolchado.
Tasa de crecimiento anual.	0.17%
Calorías necesarias por persona/día.	1900 calorías
Producción potencial inicial.	2000 kg/ha
Calorías en un kilogramo de maíz.	900 calorías
Producción mínima aceptada por milpa.	400 kg/ha
Distancia máxima de cultivo.	8 km
Periodo de simulación.	400 años
Recorte temporal.	Clásico terminal 100 años (800-900 D.C.).

La mayoría de los parámetros fueron establecidos con base en datos arqueológicos como la distancia mínima de cultivo documentada por Zetina Gutiérrez (2009), y también con documentación actual cuando no fue posible encontrar datos del pasado, como las calorías necesarias por persona, descritas en el capítulo anterior.

En cuanto al periodo de simulación aquí se presenta el Clásico Terminal, sin embargo, ya que la población se estableció desde tiempo antes en la zona simulamos el establecimiento 400 años antes. Los paisajes presentados (mapas resultantes) muestran el uso con la densidad mayor.

3.6.5. Escenarios con agricultura Roza, Tumba y Quema

Los escenarios con uso exclusivo de agricultura R-T-Q en todas sus combinaciones, colapsaron antes del año 800 D.C. (Inicio del Clásico Terminal) (Tabla.3-5). Los valores de densidad en estos escenarios durante el Clásico Terminal (800-900 D.C.) son considerablemente inferiores a los esperados para el periodo, iniciando un segundo periodo de crecimiento después del colapso (Fig.3-14).

El paisaje agrícola resultante se puede observar en la Fig.3-15, este paisaje es muy similar para cada densidad. En este caso se muestra la densidad más alta (D3) en el año 800, 850 y 900. Las milpas rotan a través del tiempo y conforme avanza el tiempo, se abren más espacios de cultivo.

Tabla 3-5: Año de colapso de la población con R-T-Q. Escenarios AD (Asentamientos dispersos), ACC (Asentamientos altamente concentrado alrededor de los centros) y AMC (Asentamientos medianamente concentrado alrededor de los centros).

Tipo de	Densidades		
escenario	25 hab/ km^2	63 hab/ km^2	134 hab/ km^2 .
AD	704 D.C.	570 D.C.	556 D.C.
ACC	704 D.C.	571 D.C.	556 D.C.
AMC	708 D.C.	571 D.C.	557 D.C.

Los escenarios con agricultura R-T-Q en asentamientos altamente y medianamente concentrados a los centros se pueden observar en el Anexo I.

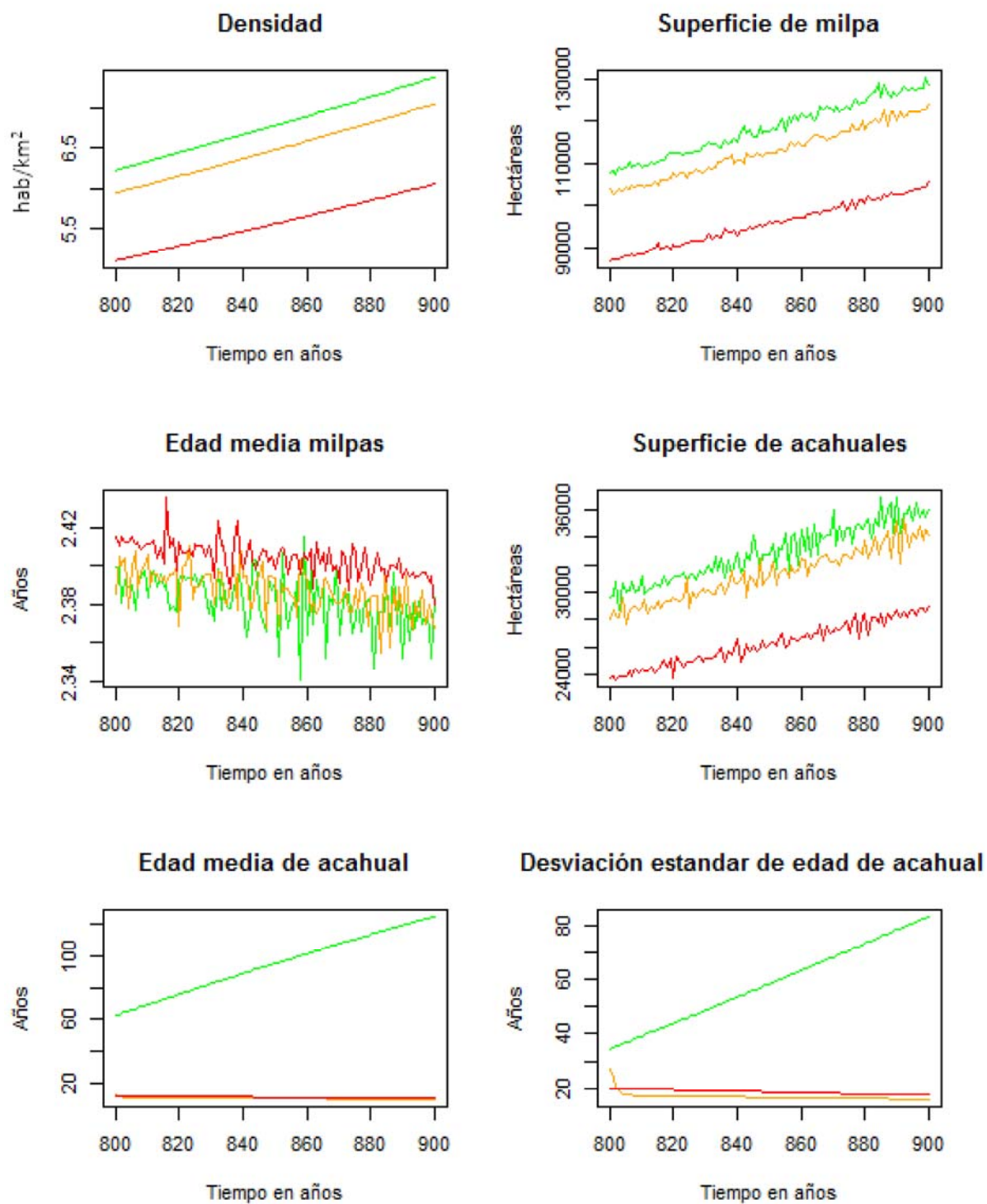


Figura 3-14: Escenario con distribución de asentamientos dispersos y agricultura R-T-Q. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1)

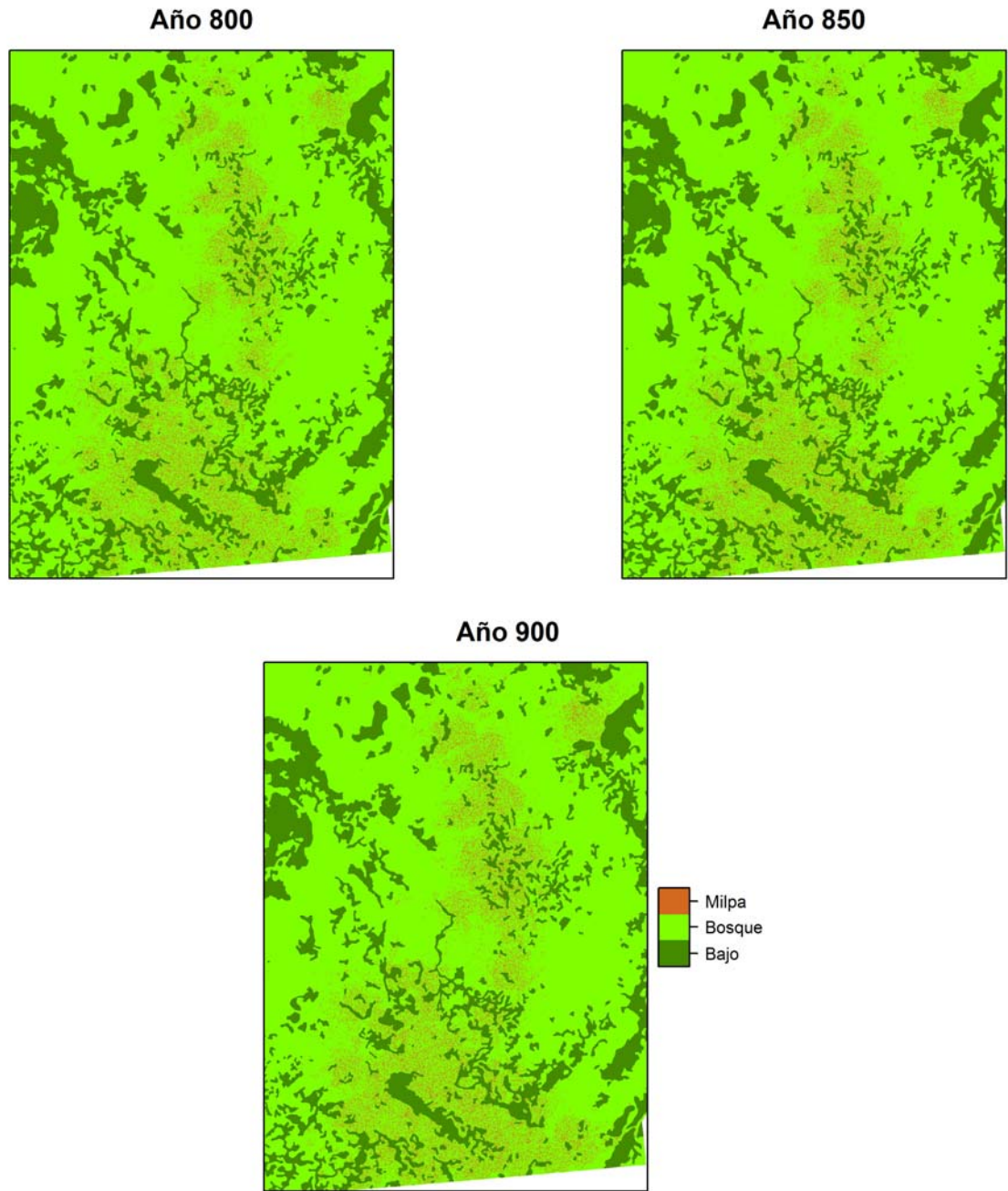


Figura 3-15: Paisaje con la distribución de asentamientos dispersos y agricultura R-T-Q.

3.6.6. Escenarios con agricultura Roza, Tumba y Quema y agricultura intensiva

Escenarios con agricultura R-T-Q y agricultura intensiva en asentamientos dispersos

La adición de la agricultura intensiva al sistema tradicional R-T-Q, permite un aumento de la permanencia de la población en todas las densidades. Al inicio del Clásico Terminal se observa que el número de habitantes entre D1 y D3 va de 24 a 36 hab/ km^2 (450,000 a 600,000 habitantes) mostrando que la combinación de prácticas agrícolas puede mantener un mayor número de habitantes.

Particularmente podemos notar que las densidades mayores (D2 y D3), colapsan antes del Clásico Terminal. En D2 (63 hab/ km^2), se observó un decaimiento en el año 746 D.C. Por lo que en el periodo del 800-900 D.C. observamos una segunda fase de crecimiento o repoblación. Es posible ver que hacia el año 860 D.C. la densidad dos (D2), muestra cambios en las variables edad de las milpas, edad de los acahuales y la desviación estándar de la edad de los acahuales, indicando que el sistema obedece a una sobrepoblación e indica un posible segundo colapso en los siguientes años (Fig.3-16). La densidad tres (D3) sufre colapso desde el año 562 D.C. y un segundo colapso hacia el año 860 D.C. Esto es debido a que la configuración de este sistema (R-T-Q y agricultura intensiva) tiene una carga máxima de 36 hab/ km^2 .

El modelo en D3 simula el colapso a partir de la falta de recursos para mantener a la población que crece. Cuando no existe nuevas tierras que abrir, mantiene las milpas con baja productividad (no abandona) y recorta el tiempo de permanencia de los acahuales (edad media de los acahuales (Fig.3-16 en D3), por lo tanto, la superficie de milpas crece aun cuando son menos productivas y la superficie de acahuales jóvenes también crece en un intento de subsanar la demanda de la población. Si la población aumenta la demanda por arriba de 36 hab/ km^2 el sistema colapsará. La Fig.3-17 representa el paisaje del escenario con mayor densidad (D3), y muestra que la población en el año 850 ocupa casi el total del área disponible de cultivo justo un año antes del colapso, indicando la desocupación en el año 860, y una posterior recuperación en el año 900 con menor cantidad de habitantes. El escenario con agricultura R-T-Q y agricultura intensiva en asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros, tiene el mismo comportamiento que este escenario (Anexo 2).

Los bosques en recuperación son considerados acahuales con distintos estados de conservación, a partir de las edades que presentaban después de haber sido milpas. Acahuales jóvenes con vegetación secundaria fueron aquellos menores a 20 años, mientras que acahuales mayores a 20 años se consideraron como bosques maduros. En el año 800, el 51.7% de la superficie representa acahuales jóvenes, el 40% la Milpa y el 7.9% bosques maduros. Para el año 850, periodo muy cercano al colapso en la simulación, los porcentajes cambiaron hacia la degradación del paisaje, ya que la Milpa ocupó el 64.5% del área, el

acahual 35.4 % y no hay bosque conservado. Para el año 900, se observa un estado de recuperación del bosque maduro con el 20 % de la superficie, una disminución en las milpas con un 32.5 % y un aumento en los acahuales jóvenes con un 46.8 % (Fig. 3-18).

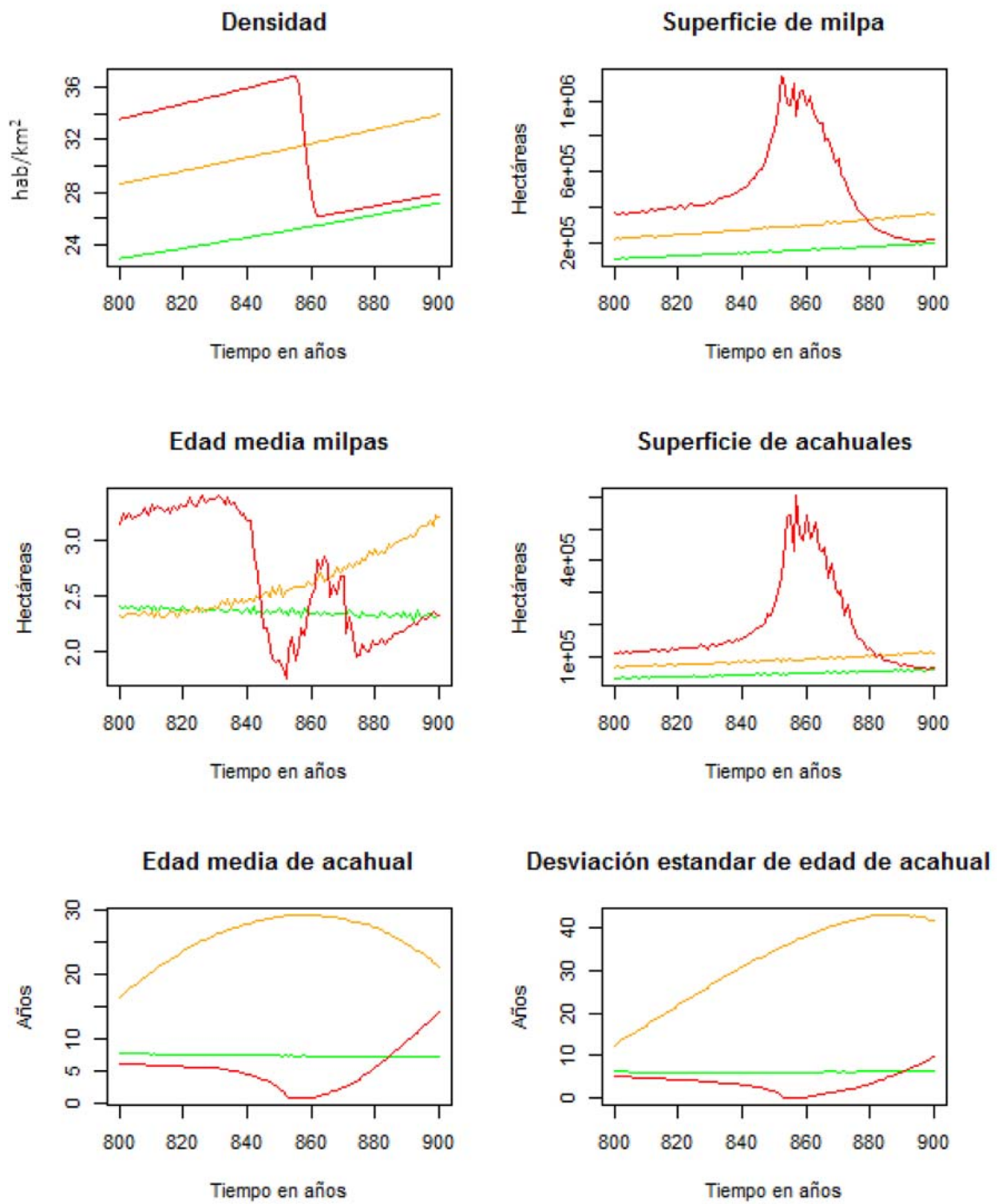


Figura 3-16: Escenario con distribución de asentamientos dispersos y con producción en bajos. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).

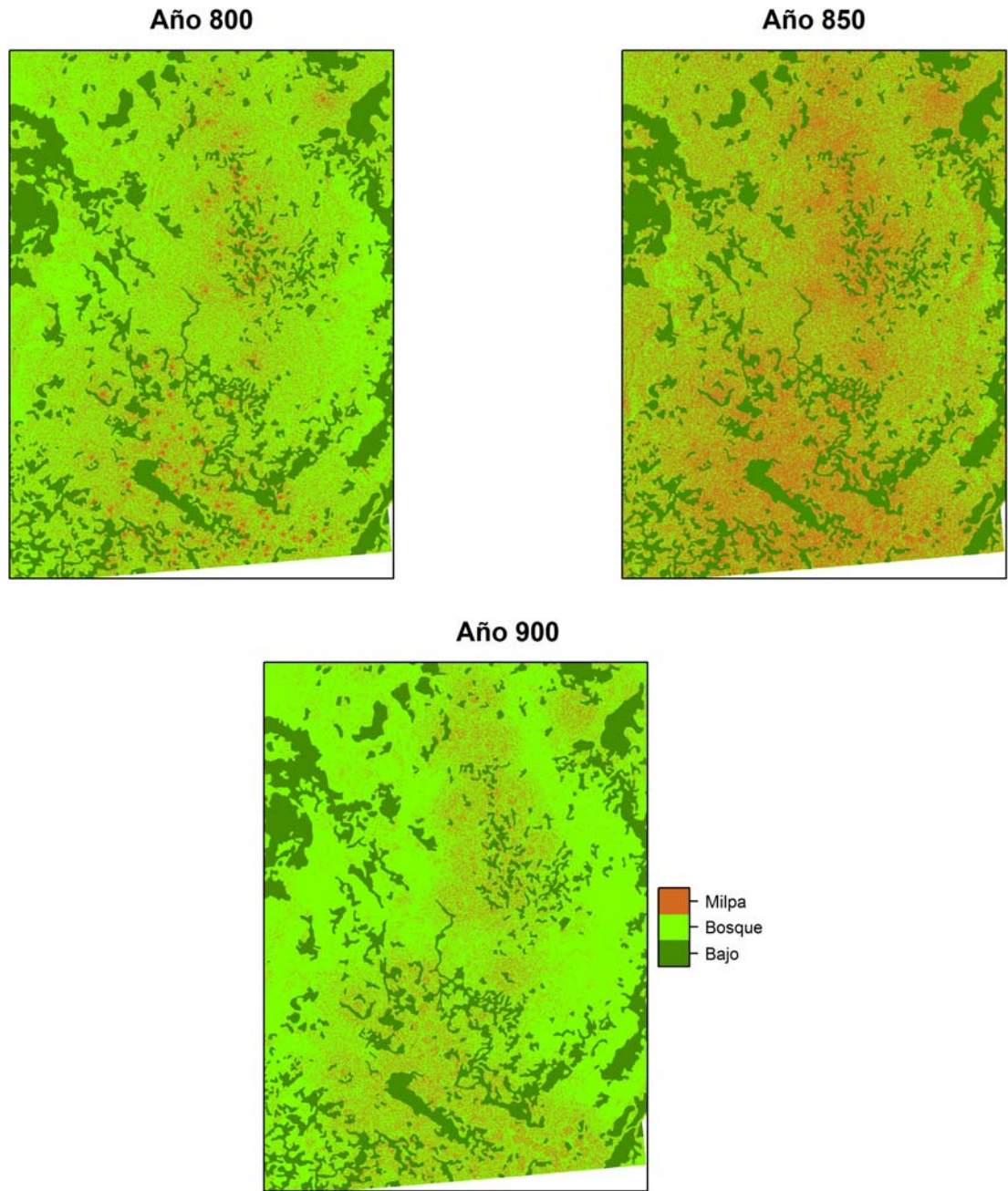


Figura 3-17: Paisaje con asentamientos dispersos y agricultura intensiva en bajos más R-T-Q.

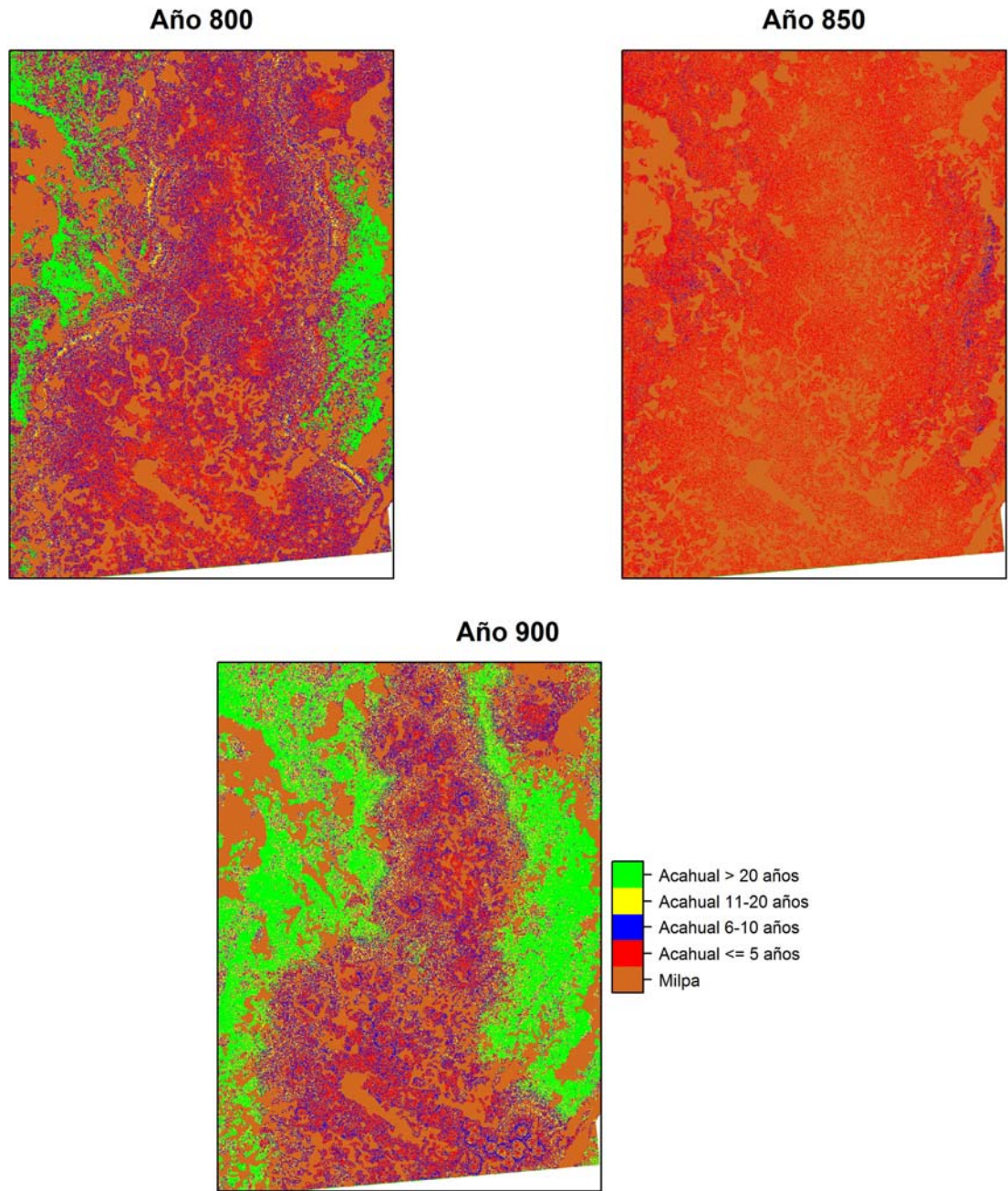


Figura 3-18: Paisaje con la vegetación en recuperación (acahuales).

Escenarios con agricultura R-T-Q y agricultura intensiva en asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros

El uso de la combinación de sistemas agrícolas intensivo y extensivo, genera un aumento en la población que puede mantener el modelo, en estos escenarios la población colapsa antes del periodo Clásico Terminal para las densidades D2 y D3, al igual que ocurre con los primeros tres escenarios que utilizan exclusivamente agricultura R-T-Q. Sin embargo, el sistema tolera densidades por arriba de D1 (25 a más de 36 hab/ km^2). El escenario D3 es diferente con respecto a D1 y D2 ya que la presión de la población en D3 parece ser muy demandante para el sistema. Esto lo podemos observar porque las variables superficie de milpa y superficie de acahual, aumentan significativamente durante el final del Clásico Terminal, después de que la población se repuso al colapso entre el 500-600 D.C. en D3. La disminución de edad media de las mipas y aumento de la superficie de acahual en D3 desde el año 870 aprox D.C. también indica que posteriormente habrá un colapso (Fig.3-19). En cuanto a D2, aunque hay una repoblación parece estar un paso atrás de D3 hacia el colapso nuevamente, si tomamos en cuenta que la densidad esperada es de 63 hab/ km^2 , y el sistema soporta un max de 34 hab/ km^2 , las fluctuaciones de la edad media de acahual y de la desviación estándar de acahual indican inicio de presión por parte de la población (Fig.3-19 en D2), aun cuando las otras variables se encuentran estables.

El paisaje de estos escenarios con los asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros, abre milpas en forma concentrada a las ciudades o centros urbanos (Fig.3-20.). Esté efecto no es sustentable, pero hace que el modelo decida abrir los lugares menos probables alejados de los centros para satisfacer las necesidades de la población (Fig.3-20). Aun así, el paisaje muestra mayor concentración de superficie de cultivo a una distancia menor de los centros urbanos, limitando el espacio a la población, y entonces se ven forzados a utilizar acahuales jóvenes para transformarlos en milpas y, por lo tanto, tenemos menor producción por área cultivada como lo muestran las gráficas para la densidad D3 en la edad de acahual y desviación estándar de acahual.

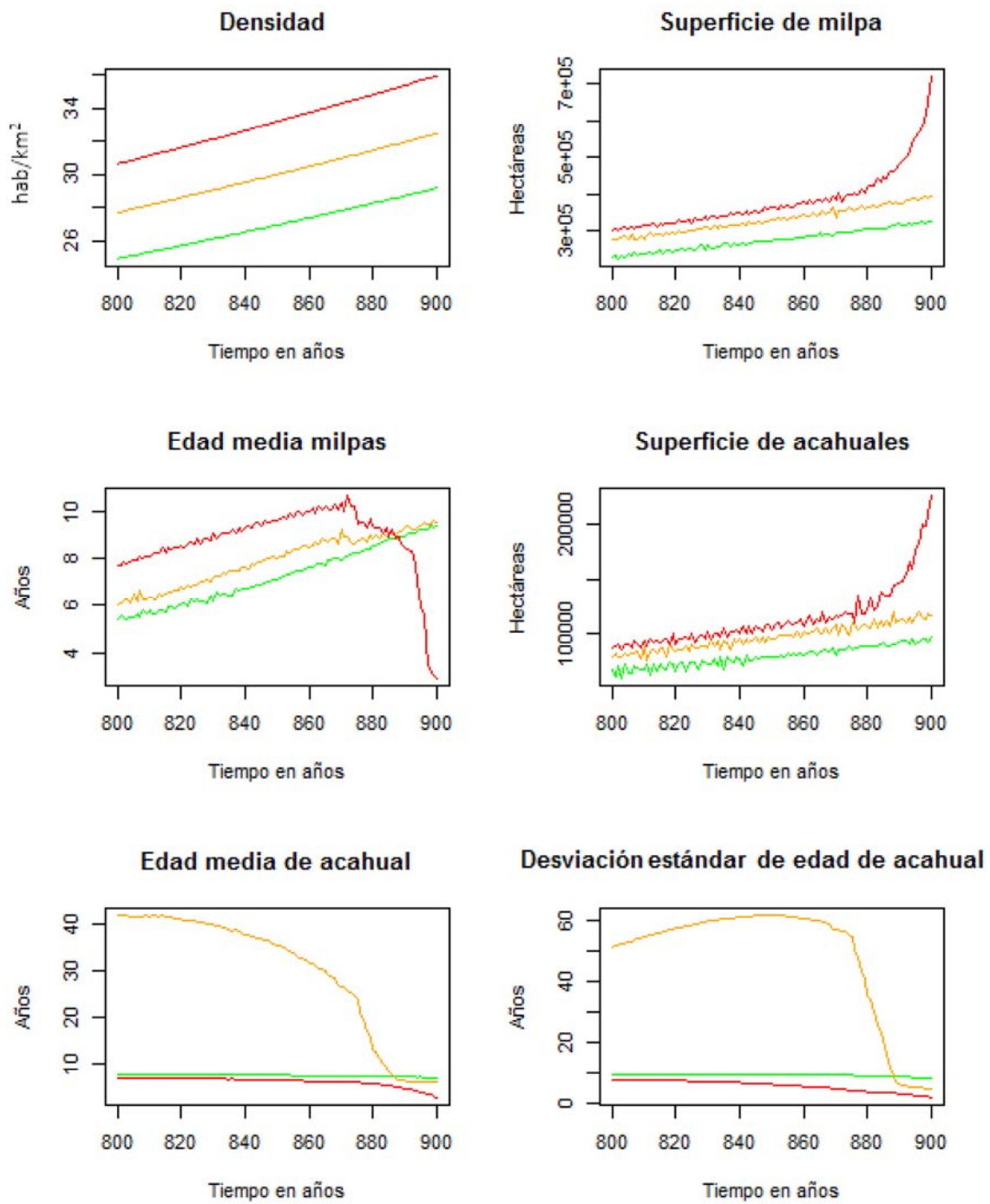


Figura 3-19: Escenario con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y con producción en bajos. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).

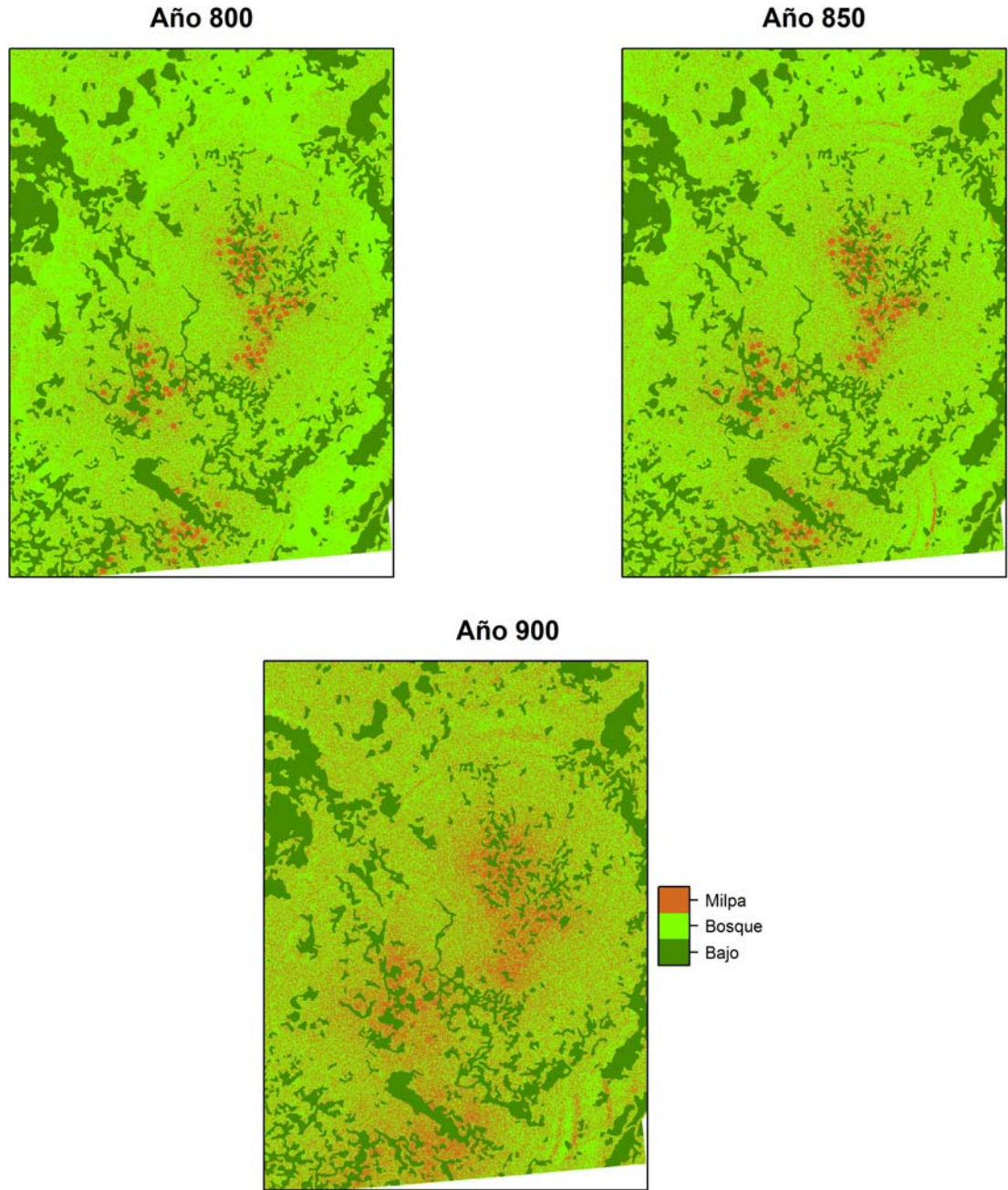


Figura 3-20: Paisaje con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva en bajos más R-T-Q.

3.6.7. Escenarios con agricultura intensiva (*Bosque artificial y/o Acolchado*)

En estos escenarios son de uso exclusivo de agricultura intensiva. Simulando cuidados adecuados al suelo que genera rendimientos estables todos los años. Generando que las poblaciones que pueden permanecer en el área (D3 con $140 \text{ hab}/\text{km}^2$), sean mucho mayores a los anteriores escenarios y afirman que bajo estas condiciones Calakmul pudo ser una población con densidades muy elevadas. Las tres densidades en conjunto tienen un rango de entre 20 y $140 \text{ hab}/\text{km}^2$ al final del Clásico Terminal. Esto indica que pudo existir un reino densamente poblado en el periodo Clásico Terminal (3-1),(Fig.3-21).

Los paisajes de estos escenarios muestran que ninguno se encuentra en su totalidad cultivada. Sin embargo, en los tres tipos de distribución para el año 900 D.C. los recursos forestales ya son muy limitados y es probable que si la tendencia de crecimiento población continua, el colapso es inminente en tiempos posteriores (Fig.3-22). Los paisajes de la Figura. (3-23) y Figura (3-24) tienen una distribución altamente y medianamente concentrada a los asentamientos respectivamente.

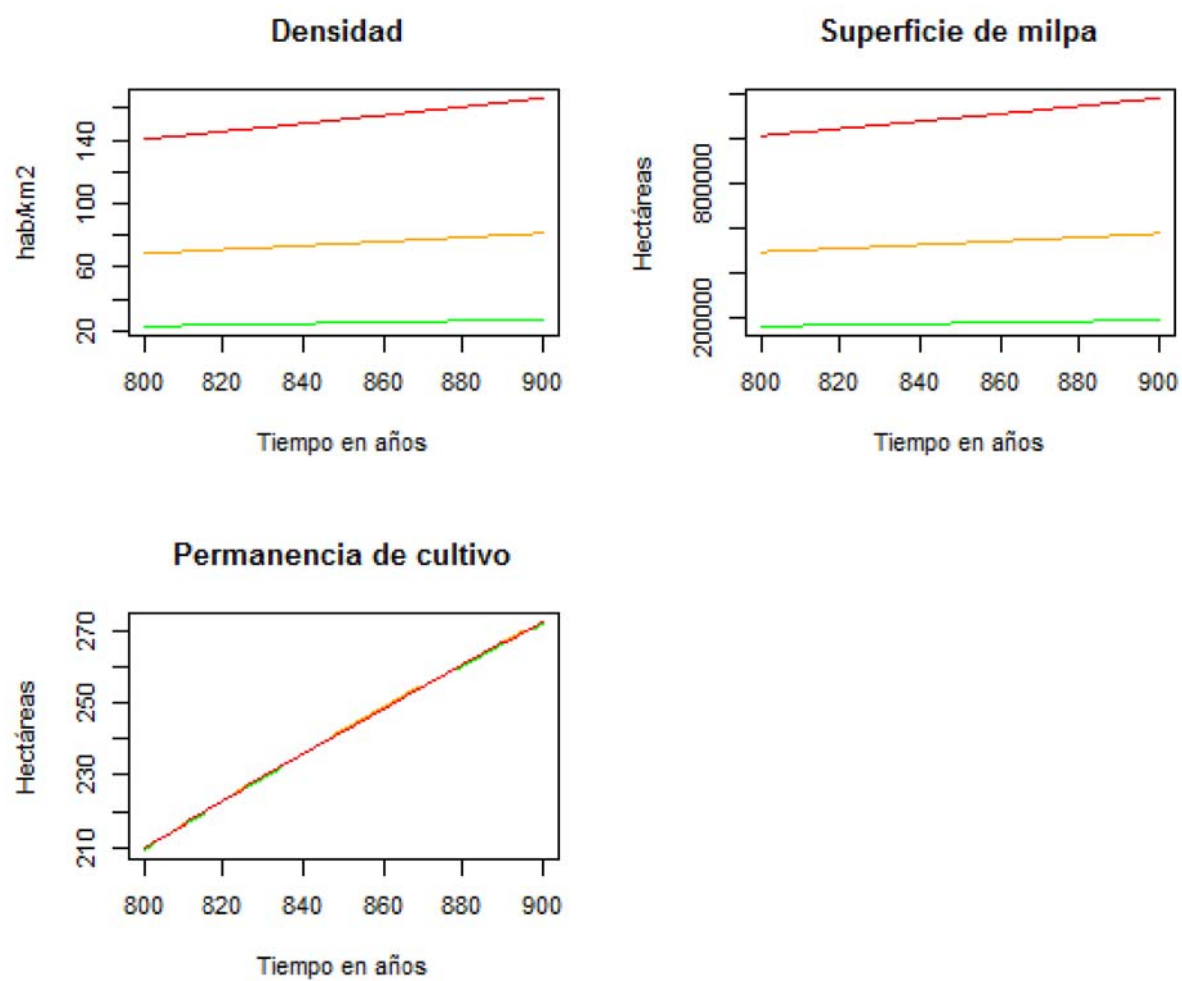


Figura 3-21: Respuesta de la población en las tres distribuciones utilizando agricultura intensiva en bajos y agricultura bosque artificial y/o acolchado

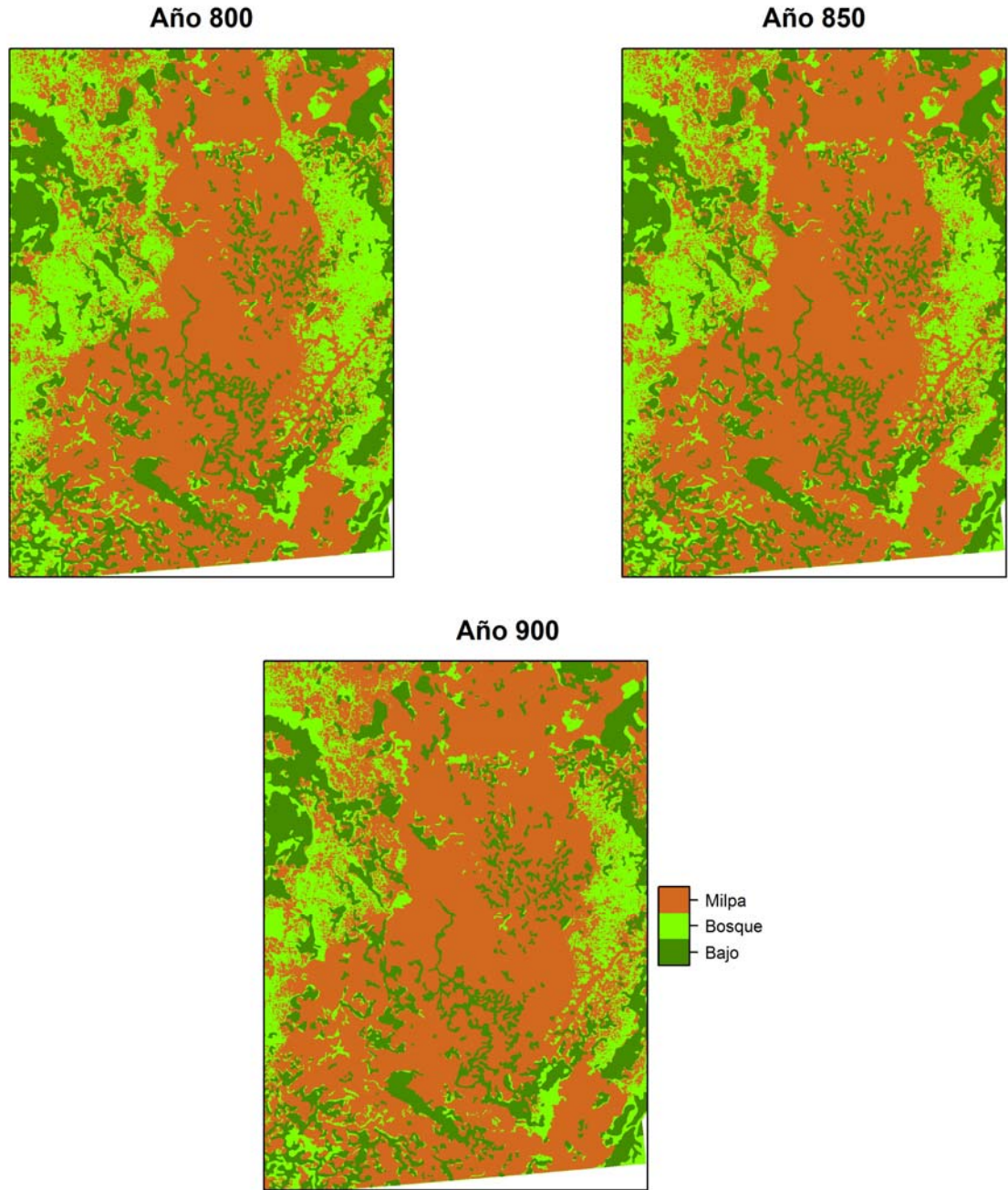


Figura 3-22: Paisaje con asentamientos dispersos y con agricultura intensiva en bajos y agricultura intensiva mas bosque artificial y/o Acolchado.

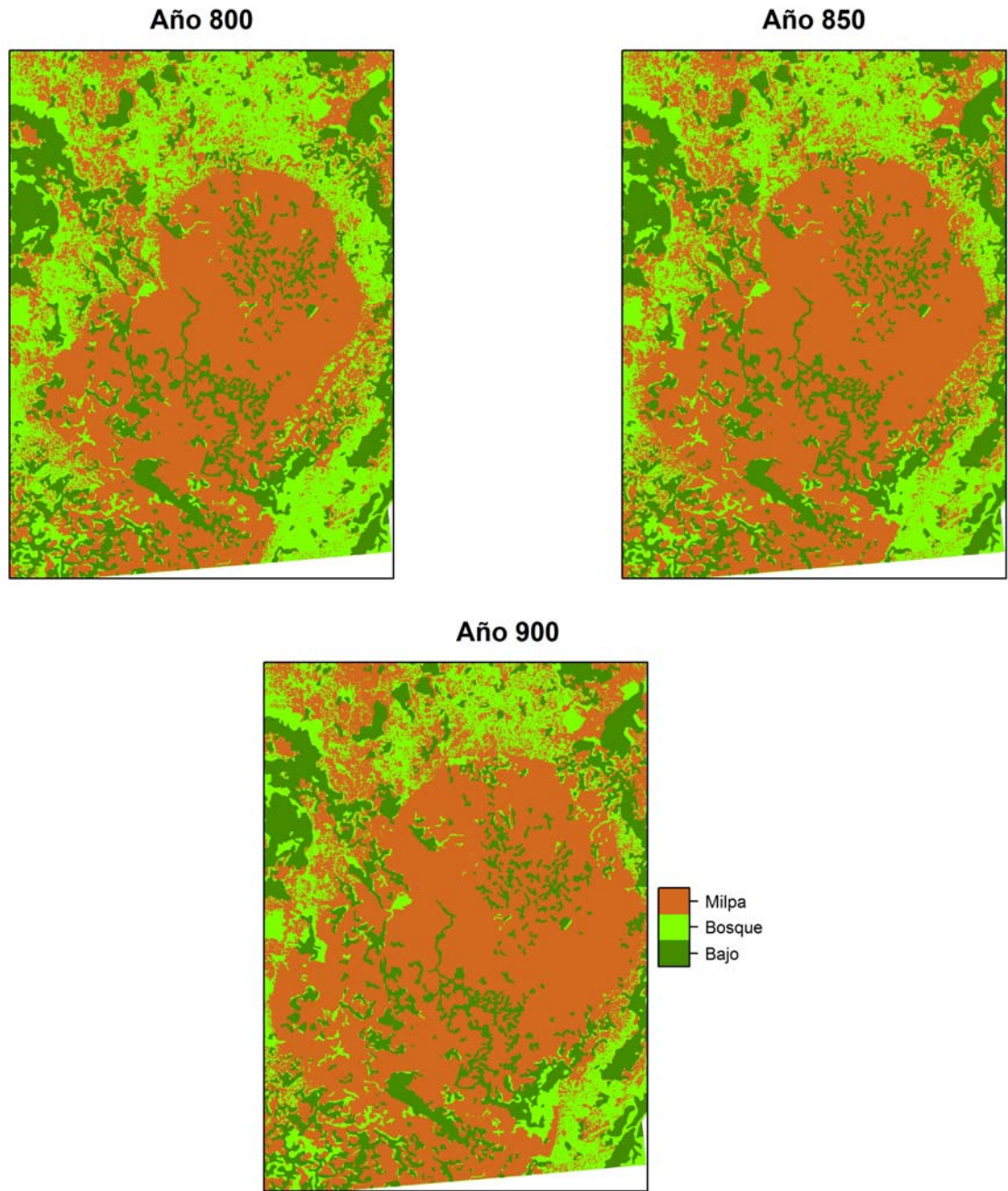


Figura 3-23: Paisaje con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva mas bosque artificial y/o Acolchado.

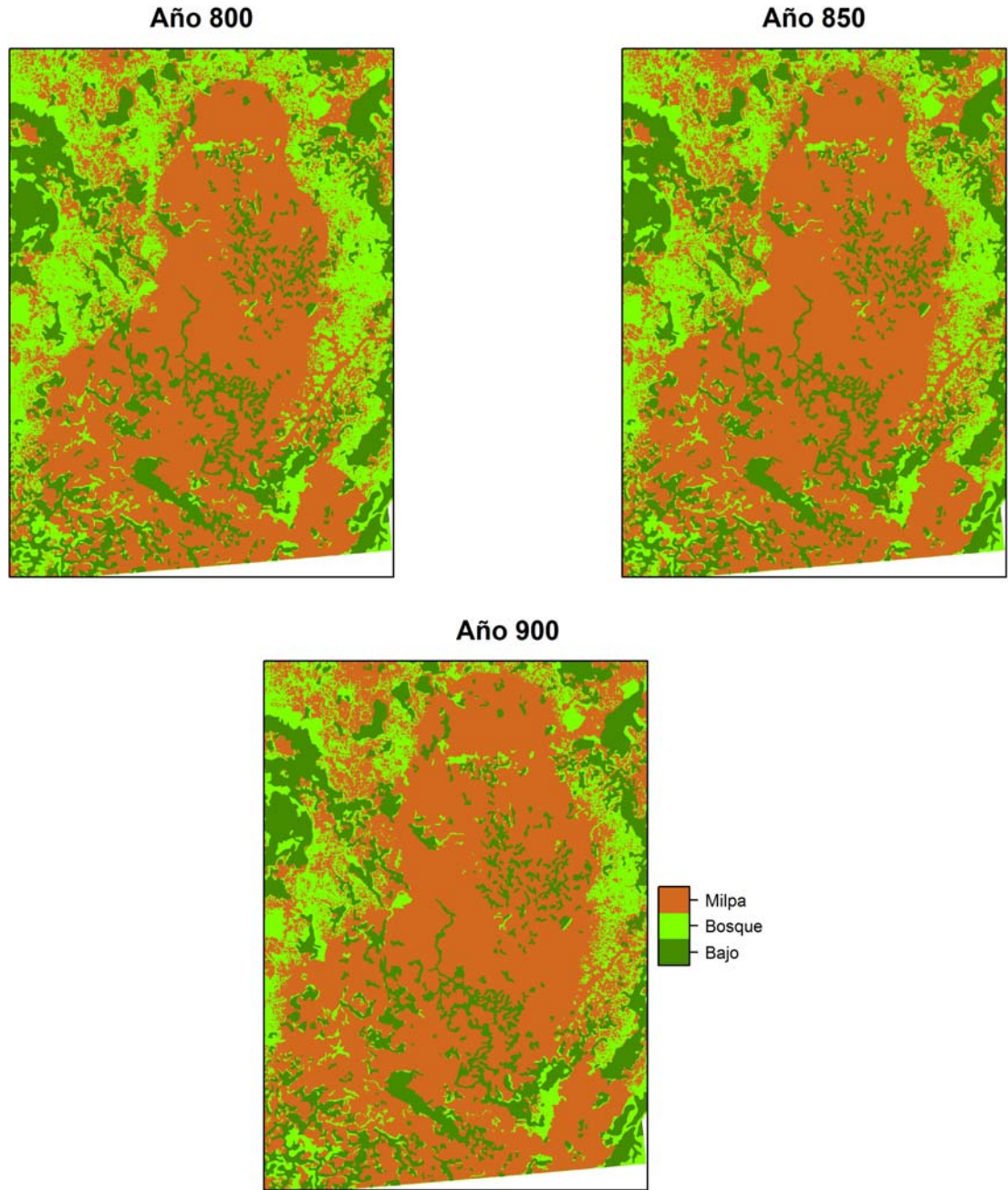


Figura 3-24: Paisaje con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva mas bosque artificial y/o Acolchado.

3.6.8. Análisis de polen fósil

En la presente sección se realiza una reconstrucción paleoambiental para el periodo Clásico Tardío que abarca el rango de tiempo utilizado para la modelación. El análisis de polen fósil obtenido a partir de los núcleos de sedimento realizados en la Aguada Oxpemul y la laguna Chumpich, indica la presencia de elementos de disturbio y cultivo asociados con la actividad agrícola durante el Clásico Tardío. Tanto la actividad agrícola como los elementos de disturbio se observan en los modelos simulados (cultivo y acahual).

Aguada Oxpemul

Este núcleo es el más cercano a la Ciudad Estado de Calakmul (Fig.3-10). Observamos presencia de elementos de disturbio (Asteráceas y Poaceae), y de cultivo (Cucurbitaceae y Chenopodiaceae) (Fig.3-25).

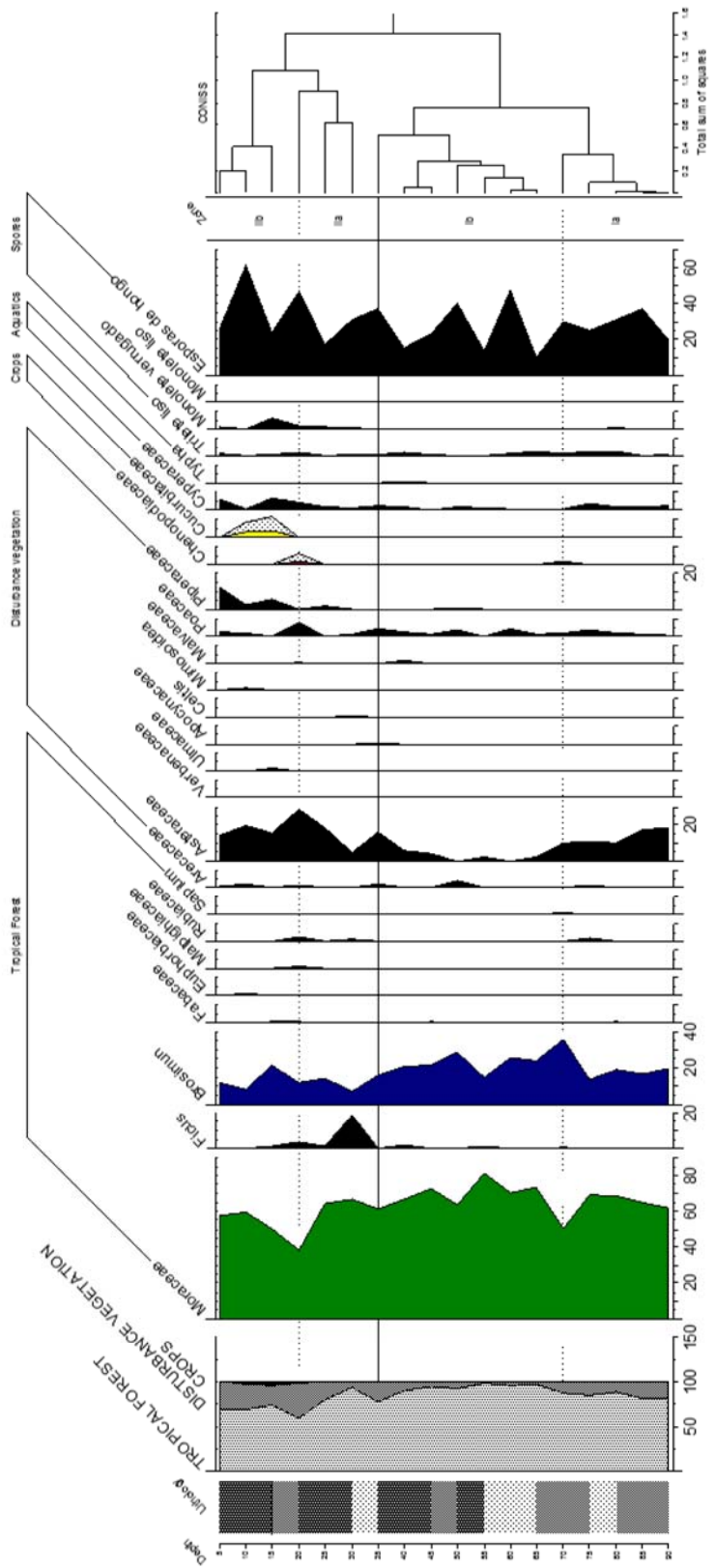


Figura 3-25: Diagrama de polen fósil encontrado en la Aguada Oxpemul

Chumpich, Uxul

Para el núcleo obtenido en la laguna Chumpich, se elaboró un modelo de edad/profundidad con base a dos fechas radiocarbono (Tabla.3-6) y (Fig.3-26).

Tabla 3-6: Edades de Radiocarbono.

Profundidad	Edad en años (A.P.) 14C	Rango de edades calibradas	Media
46	1540 +/- 30	cal A.P. 1524-1365	cal A.P. 1451
67	2430 +/- 30	cal A.P. 2520-2354	cal A.P. 2464

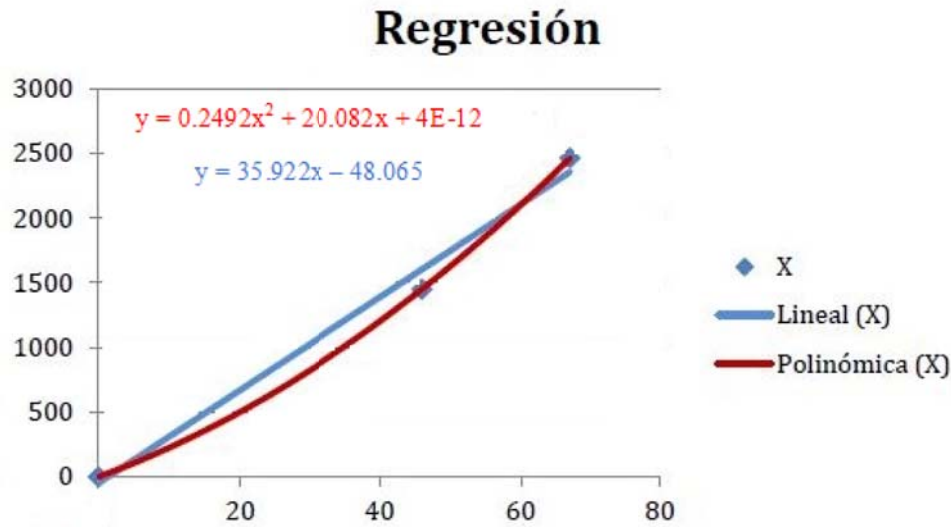


Figura 3-26: Modelo de edad Chumpich.

En el diagrama polínico es posible observar las muestras correspondientes al Clásico Terminal (recuadro azul de la Fig.3-27), donde el bosque tropical es el que domina con distintos taxones como: Fabaceae (Leguminosae), Combretaceae, Ficus sp., Moraceae y Euphorbiaceae. Los elementos de disturbio observados fueron: Asteraceae (hierbas o malezas), Poaceae (pastos) y Arecaceae (palmas). Las proporciones más altas de elementos de disturbio dentro del núcleo coinciden con las mayores proporciones de taxa de cultivo registradas, principalmente elementos como *Zea mays* (Fig.3-30), Solanaceae, Cucurbitaceae (Fig.3-29a), *Ipomoea* sp. (p. ej. Camote)(Fig.3-28c) y *Cnidoscolus* sp. (p. ej. Chaya)(Fig.3-29b), así como proporciones altas de Chenopodiaceae.

El registro de polen fósil de las columnas sedimentarias analizadas indica la presencia de grandes asentamientos humanos, los cambios en la vegetación experimentados durante el periodo clásico muestran un fuerte incremento en los cultivos y una fuerte reducción del bosque tropical. La presencia de *Pinus sp.* en los sedimentos de la laguna Chumpich, indican el incremento de la apertura del dosel, la cual fue suficiente para la captación de elementos que se distribuyen desde larga distancia y lograron ser captados en el depósito sedimentario, como *Pinus caribea* el cual se distribuía en Guatemala y Belice, e incluso en la parte más sureña de Quintana Roo. Posterior al colapso cultural, la diversidad de polen y las asociaciones de vegetación, sugieren la recuperación del bosque tropical, más tarde este ecosistema experimentó perturbación ocasionada principalmente por cambio climático.

El registro de elementos de cultivo en el núcleo de polen fósil (Fig.3-28) y (Fig.3-29), corrobora la actividad agrícola en la región desde hace 3000 años A.P. Además, muestra los cambios en la composición de la vegetación durante el periodo Clásico (Torrescano-Valle y Islebe, 2015) provocados en gran medida por la actividad humana. Los registros paleobotánicos y paleoclimatológicos desarrollados en el área entre Conhuas y Calakmul indican que una importante parte de la selva fue afectada por acción antrópica durante el periodo Clásico, la vegetación había sido removida para mantener a las poblaciones mayas de esta región (Harrison y Turner II, 1978; Folan *et al.*, 1983; Domínguez-Carrasco y Folan, 1996).

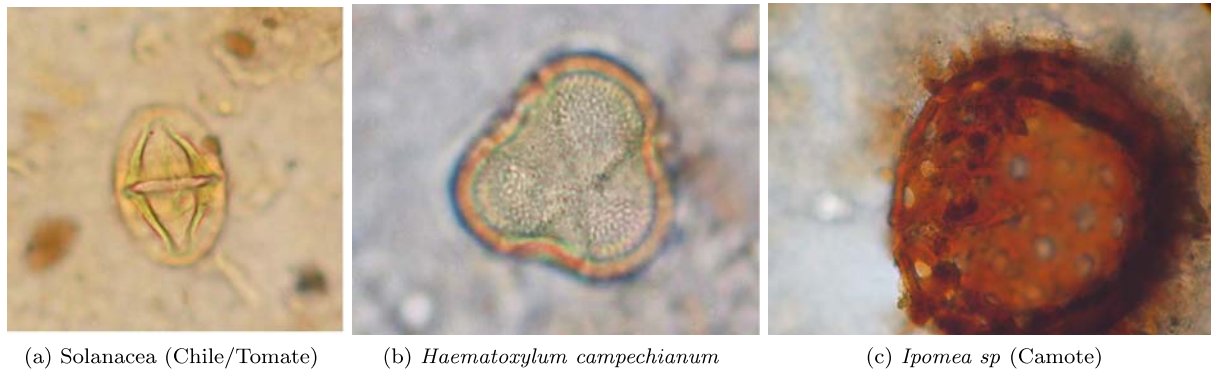
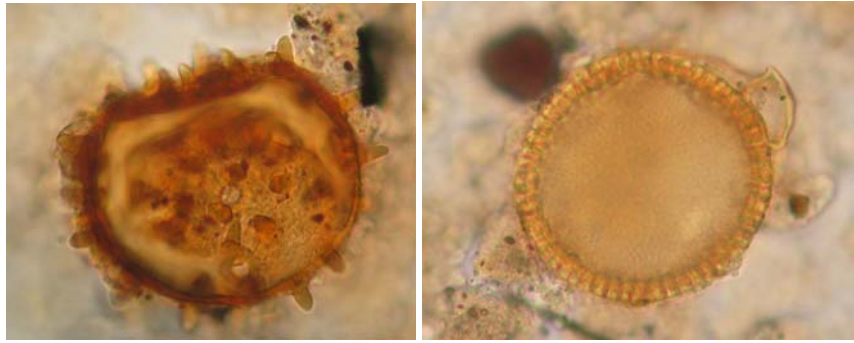


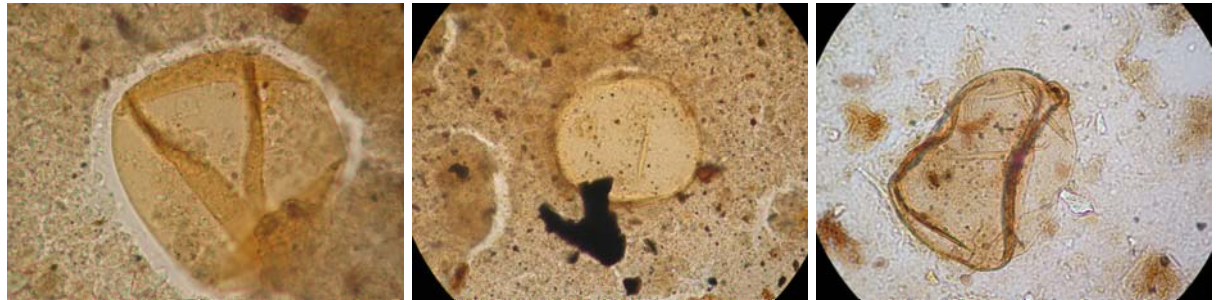
Figura 3-28: Polen fósil de plantas cultivadas.



(a) Cucurbitaceae (Calabaza)

(b) Cnidosculus (Chaya)

Figura 3-29: Polen fósil de plantas cultivadas.



(a) 1

(b) 2

(c) 3

Figura 3-30: Polen fósil de *Zea mays*

3.7. Discusión

Las ciudades mayas como Calakmul, han sido consideradas por los arqueólogos como sociedades estratificadas y complejas de gran extensión territorial (Diamond, 2005). Durante el Clásico Terminal, se ha encontrado información robusta sobre el decaimiento y desocupación de los grandes asentamientos de las tierras bajas mayas, algunos nombran a este evento “Colapso Maya” (Harrison y Turner II, 1978; Zamora, 1978; Culbert y Rice, 1990; Demarest y Rice, 2005; Diamond, 2005; Turner y Sabloff, 2012).

Este proceso de desocupación ha sido explicado a través de numerosas teorías, entre los que destacan los conflictos socio-políticos, cambio climático y fuerte intervención humana en la vegetación, llegando a un proceso de degradación ambiental (Carrillo-Bastos *et al.*, 2010; Heckbert, 2013).

Webster y Webster (2002), atribuyen el colapso al desajuste entre la población y el uso de los recursos. Mientras que Diamond (2005) y colaboradores sugieren una extensa tala y quema requerido por el cultivo migratorio, convirtiendo los bosques en pastizales, sin tomar en cuenta medidas de prevención para la erosión del suelo, lo cual pudo haber jugado un papel importante en la contribución del colapso. Esta teoría ha sido reforzada por otros autores como Turner II (1974); Turner y Sabloff (2012), quienes hacen especial referencia a los sistemas agrícolas y la intensificación que tuvieron que hacer para subsanar las necesidades de las poblaciones que ahí habitaban.

Otros autores como Hodell *et al.* (1995); Gill (2001); Medina-Elizalde *et al.* (2012); Douglas *et al.* (2016), mencionan que ciclos de extrema sequía y cambios en el clima, fueron los detonantes de la desocupación de los pueblos mayas. Por otra parte, Demarest y Rice (2005), señala que las diferencias entre los asentamientos y los conflictos socio-económicos fueron la causa del colapso maya Heckbert (2013). La combinación de una o más de estas causas no se descartan pudiendo ser un desequilibrio general de las relaciones complejas la causa del colapso Culbert (1973, 1995); Heckbert (2013).

Sin embargo, la civilización maya presentaba diversos tipos de agricultura, donde la combinación de estos pudo o no haber soportado la presión ejercida por la población sobre los recursos (Harrison y Turner II, 1978; Chase y Chase, 1998). El uso exclusivo del sistema tradicional Roza-Tumba y Quema (Harrison y Turner II, 1978), dentro de los escenarios simulados, resulto ser insuficiente para mantener a la población que los registros arqueológicos muestran en el Clásico Terminal. Las densidades designadas como entradas del modelo en conjunto con las características ambientales como la sequía o la erosión de los suelos, fueron tomadas en cuenta por el modelo y generaron relaciones complejas dentro de las simulaciones (Patterson *et al.*, 2010), tratando de acercar al modelo a la realidad de las teorías propuestas para el colapso. Mostrando que la práctica exclusiva de la R-T-Q es un escenario poco plausible, ya que colapsa debido a problemas de sequías y erosión antes del Clásico Terminal. El sistema R-T-Q, fue una práctica antigua que era utilizada comúnmente. Sin embargo, no era la única forma de agricultura que

utilizaban, por lo que entonces la agricultura intensiva toma un papel importante en la supervivencia del pueblo Maya en el Clásico Tardío (Harrison y Turner II, 1978; Denevan, 2006).

Los escenarios en los que se simulaba uso del suelo con agricultura intensiva en bajos más R-T-Q permitieron mayor número de habitantes en el área de estudio. Aun así, este tipo de agricultura intensiva no fue suficiente para mantener a la población con densidades mayores a $38 \text{ hab}/\text{km}^2$, cuando este valor fue superado, el sistema colapso, generándose una disminución dramática en la población, esto sucede en la simulaciones cuando la distribución de asentamientos es disperso y cuando los asentamientos están medianamente concentrados a los centros urbanos, coincidiendo con la mayoría de las teorías con respecto al tiempo de desocupación (Harrison y Turner II, 1978; Zamora, 1978; Diamond, 2005; Turner y Sabloff, 2012).

La evidencia de la agricultura intensiva en las zonas centrales mayas plantea interrogantes sobre la validez de teorías acerca del abuso sobre la práctica R-T-Q en grandes secciones de las tierras bajas (Chase y Chase, 1998; Lentz *et al.*, 2014). En el caso de nuestro modelo la práctica exclusiva de la agricultura R-T-Q, fue suficientemente fuerte como para despojar amplias zonas de tierras de selvas con fines de manipulación física y las repercusiones ambientales que esto generó, descartando está teoría como la razón primordial de la desocupación ya que el sistema colapsó antes del periodo registrado históricamente. A lo largo del mundo, el cultivo intensivo se asocia con especialización en los cultivos, así como en la técnica de cultivo. Los sistemas agrícolas intensivos fueron la respuesta al aumento de la demanda en la producción agrícola debido a un aumento de la población para el Clásico Tardío iniciando las terrazas alrededor de los 500-600 D.C. hasta los 830-1050 D.C (Turner II, 1974; Chase y Chase, 1998).

La agricultura intensiva en combinación con la practica R-T-Q pudo mantener la presión que la población ejercía sobre el ambiente hasta el Clásico Terminal, pero un cambio ambiental como las sequías continuas y prolongadas documentadas tanto en nuestro registro paleoecológico como en otros estudios, indican que las poblaciones mayas no soportaron las condiciones para mantener las actividades agrícolas de R-T-Q en combinación con agricultura intensivas (Carrillo-Bastos *et al.*, 2010; Medina-Elizalde *et al.*, 2012; Nooren *et al.*, 2017). En este caso los datos obtenidos por Medina-Elizalde *et al.* (2012); Torrescano-Valle y Islebe (2015) indican cambios en el patrón de precipitaciones, los cuales pudieron estar asociados a un sistema socio-político inestable, provocando la desocupación de la compleja población que se encontraba establecida en Calakmul (Zamora, 1978).

Algunos autores señalan que cuando los sistemas complejos como los ecosistemas y las civilizaciones humanas se encuentran en desequilibrio pueden llegar a un punto de no retorno; donde el sistema entra en un estado de estrés y llega un punto en el que las afectaciones son irreversibles y si el cambio negativo del sistema continúa, este puede llegar a colapsar, algo que al parecer pudo haber sucedido en las tierras bajas de la cultura Maya y que el modelo simula de cierta manera en los escenarios (Scheffer *et al.*,

2001; Scheffer, 2009). Este mismo efecto de desequilibrio es observado por Heckbert (2013), quienes desarrollaron un modelo con enfoque en agentes y celular autómatas para simular condiciones socio-ecológicas de la civilización maya.

En el escenario con uso exclusivo de agricultura intensiva (bosque artificial y acolchado), la población persiste a través del tiempo. Este escenario representa una alternativa de permanencia de la población en la que hay que tomar consideraciones, pues la productividad que simula este escenario puede ser sobreestimada, ya que el ser humano difícilmente puede producir esta cantidad de alimento. Ya que implementar un sistema intensivo en las condiciones que vivía el pueblo Maya llevarían varios ensayos para poder instaurarlos como algo permanente y que tuvieran altas tasas de productividad, debido a que en la actualidad los sistemas intensivos conllevan mucho trabajo para permanecer y establecerse (Gerber *et al.*, 2013). Nuestras simulaciones de los escenarios en el modelo de Calakmul no son capaces de predecir lo que sucedió en el sistema socio-ambiental, pero si nos ayuda a descartar teorías, cumpliendo su objetivo como simplificación de la realidad (Paegelow *et al.*, 2013). Aun cuando el modelo puede llegar a descartar algunas teorías o escenarios, este presenta limitaciones de índole técnico, y otras que son ajenas al funcionamiento del modelo, como la cantidad y calidad de los insumos que podemos obtener del paisaje histórico para modelar. Otras limitaciones de este tipo de modelos ya han sido discutidas ampliamente en el primer capítulo de esta tesis.

Las limitaciones inherentes que el modelo CCUS de Calakmul tiene son variados; entre ellas la falta de una validación estadística que mida la fiabilidad del patrón de cambio simulado, cómo es posible en los modelos de CCUS actuales y los retrospectivos (Mas, 2012; Paegelow y Camacho Olmedo, 2008a; Paegelow y Olmedo, 2010; Paegelow y Camacho Olmedo, 2008b). El modelo tampoco simula procesos importantes que pudieron ocurrir en la zona y que la literatura arqueológica indica como posible causas del colapso, limitándose a simular procesos ambientales, dejando de lado procesos socio-políticos como encuentros bélicos con ciudades rivales como Tikal que tuvieron influencia en el comportamiento de las poblaciones (Carrasco y Colon, 2005; Domínguez-Carrasco y Folan Higgins, 2015). Algo similar sucede en el caso del comercio, pues no hay un efecto de esta práctica en las simulaciones realizadas por nuestro modelo. A pesar de que Heckbert (2013) mencionan la disminución de las actividades comerciales de la civilización Maya como una de las principales causas de su declive. También, se sabe que durante el Clásico Terminal Calakmul tenía relaciones comerciales y culturales con otras civilizaciones en el centro de México (Domínguez-Carrasco y Folan Higgins, 1998; Geovannini y Martínez-Dávila, 2008).

En el caso de las limitaciones que no son propias del modelo, se encuentra la calidad y cantidad de los insumos, los cuales se basan en interpretaciones de datos arqueológicos y paleoecológicos que dan origen a diferentes teorías. Estas inferencias del pasado dan origen a los escenarios que podemos tener

del CCUS, específicamente del comportamiento de las poblaciones (Estévez y Pajón, 2006; Yu *et al.*, 2012).

Los modelos espacio-temporales históricos pueden tener variadas limitaciones desde la concepción de su elaboración, pasando por los insumos, el proceso de espacialización hasta las dificultades técnicas cuando se usan programas con la información histórica (Lemmen y Khan, 2012; Yu *et al.*, 2012). Sin embargo, como se ha mencionado en los anteriores capítulos, el conocer el pasado ambiental y reconocer que los seres humanos somos parte de la historia del paisaje, nos ayuda a comprender puntos importantes a tomar en cuenta en el estudio del CCUS que el hombre hace actualmente y ser más consciente de los cambios que generamos, así como de las posibles consecuencias que estos cambios puedan repercutir tanto en el medio ambiente como en las sociedades humanas (Hayashida, 2005).

El enfoque histórico del CCUS es un enfoque nuevo en los estudios de CCUS, pues en décadas recientes el reconocimiento del efecto que el hombre tiene sobre los sistemas ambientales locales y globales es mayor (Williams, 2000; Ruddiman y Ellis, 2009a). Por lo que es importante refinar las metodologías en los estudios de CCUS históricos para generar modelos más certeros que muestren de forma fiable la realidad del pasado.

3.8. Conclusiones

La reconstrucción del uso del suelo en la Ciudad Estado de Calakmul es útil para evaluar la actividad humana y los cambios en el ambiente de forma espacio-temporal. Además, muestra la diversidad de posibilidades según las teorías más aceptadas.

En cuanto al impacto de la degradación ambiental, sigue siendo difícil estimar a través del modelo, pero la información palinológica coincide con altos procesos de alteración en la vegetación, por lo que podemos concluir que existían importantes niveles de presión sobre la naturaleza circundante a Calakmul.

La aplicación de modelos de CCUS del pasado es una opción para aproximarnos a posibles escenarios futuros de nuestro presente, ya que tiene la ventaja de hacer simulaciones dinámicas en el tiempo. Sin embargo, debemos ser conscientes de que la modelación es un ejercicio de simplificación de la realidad, y que los resultados deben interpretarse con cautela, ya que como en este caso, los sistemas socio-ambientales, suelen ser complejos y muchas veces es más fácil simular los procesos ambientales como en el modelo de CCUS en Calakmul que los procesos socio-políticos, pues se carece de información y herramientas para generar estas simulaciones.

El modelo de CCUS en Calakmul representa en cierta medida el uso humano del suelo y sus prácticas agrícolas de forma espacial y temporal, dando una nueva forma de investigación arqueológica. Permite simular el pasado agrícola de la civilización Maya, entrecruzando las variables de un sistema complejo y dinámico. También permiten simular la interacción de diferentes prácticas agrícolas, ayudando a reconstruir la historia del ambiente de Calakmul y proporcionando información acerca del paisaje del pasado Reino de Calakmul.

CONCLUSIONES GENERALES

A través del proceso de esta investigación hemos observado la importancia del estudio de los CCUS del pasado, a partir de la comprensión de las interacciones entre el cambio y los procesos ambientales y sociales observados en los modelos contemporáneos. Los modelos contemporáneos tienen una amplia gama de enfoques, métodos y software para desarrollarlos, características de las que carecen muchos de los modelos realizados para el pasado, además de la cantidad y calidad de los insumos disponibles para generar los modelos en tiempo pasado.

Los insumos de los modelos de CCUS del pasado son registros provenientes de otras ciencias como; la historia, la arqueología, la paleoecología, las cuales por lo general no brindan información temporal y espacial detalla y/o continua, por lo que la escasez y las características de estos insumos hacen que los modelos históricos difícilmente puedan basarse en un enfoque específico. Sin embargo, a través de la experiencia de esta investigación encontramos que el uso de un enfoque híbrido entre el basado en los datos y en conocimiento experto es una manera de abordar la modelación histórica.

Por otro lado, los objetivos de los modelos del pasado y los insumos disponibles, definirán las directrices en las que se tiene que construir el modelo. Los modelos basados en agentes preferentemente son utilizados cuando se desea modelar la toma de decisiones, mientras que los modelos basados en patrones son sugeridos cuando se quiere reconstruir el paisaje o simular los patrones de CCUS del pasado. Sin embargo, para cada tipo de enfoque las limitaciones siempre serán la cantidad y calidad de los insumos, ya que estas afectarán directamente el desempeño del modelo y limitarán las posibilidades de evaluarlo. Por tal motivo, siempre se debe estar consciente de que la modelación es un ejercicio de simplificación de la realidad, y que los resultados deben interpretarse con cautela.

Evaluar los cambios en el paisaje prehispánico a través del modelo de CCUS Sistemas Agrícolas con un contexto actual y utilizando parámetros del presente como el efecto de la fertilidad en el suelo simulado, y las propiedades que tiene este tipo de agricultura para satisfacer las necesidades humanas, nos permitió simular el paisaje bajo diferentes escenarios y evaluar tanto la frecuencia como la duración de los diferentes elementos los sistemas agrícolas, mostrando diferentes comportamientos dependiendo de la superficie agrícola que se necesitaba. El proceso de intensificación de la R-T-Q, también se vio reflejado al aumentar las necesidades de la población debido al crecimiento de los habitantes en el área.

Finalmente fue posible construir el modelo de CCUS para el área de una de las civilizaciones más importantes de América prehispánica, como lo fue la cultura Maya, que nos permitió entender los procesos de cambio y la formulación de hipótesis sobre procesos relacionados con el uso del suelo, las actividades antrópicas y el impacto ambiental que estas actividades llevaron a plantear la teoría del Colapso en esta civilización. El modelo de CCUS histórico representa el uso humano y sus prácticas agrícolas espacial y temporalmente, dando una nueva forma de investigación arqueológica, que permite simular el pasado de las antiguas civilizaciones entrecruzando las variables de un sistema complejo y dinámico, al igual que simular la interacción de las diferentes prácticas agrícolas.

El modelo de CCUS prehispánico en Calakmul permitió combinar el conocimiento experto sobre las prácticas agrícolas y la información referente a los cambios de uso del suelo y los procesos ecológicos que normalmente se encuentran dispersos. La modelación ayudó a llevar a cabo estudios interdisciplinarios que permitieron agregar un componente espacial para la comprensión de la evolución de los paisajes en el pasado, y reconstruir la dinámica del paisaje a partir de distintos escenarios que probaron diferentes teorías. Si bien el modelo no puede indicar que escenario es el que realmente ocurrió en la historia ambiental Maya de Calakmul, este modelo realiza dos aportaciones a las ciencias que estudian el pasado de las sociedades; la primera es que ayuda a descartar escenarios, teorías e hipótesis y la segunda es que genera un contexto espacio-temporal del paisaje que refleja el pasado ambiental de la civilización Maya en Calakmul.

Anexo 1. Escenarios con agricultura Roza, Tumba y Quema

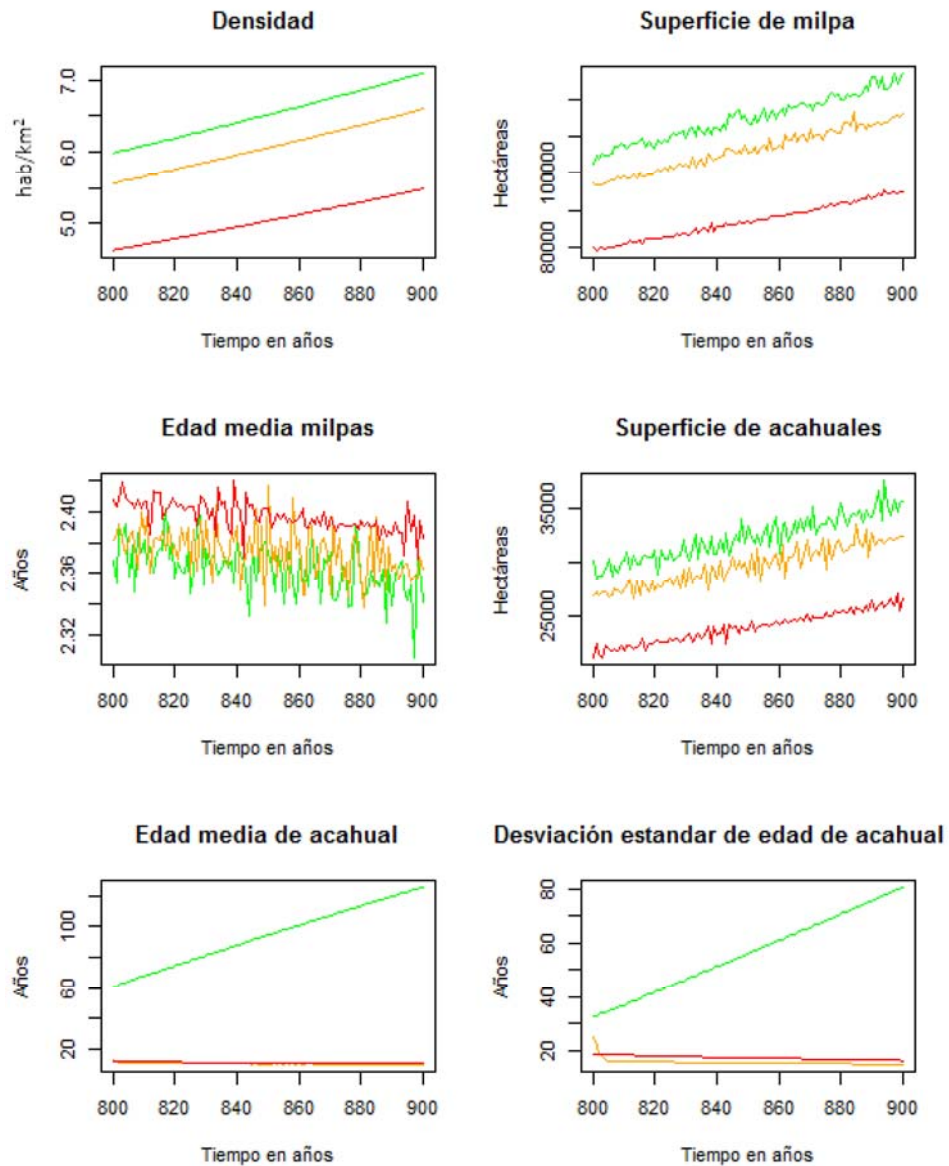


Figura 3-31: Escenario con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).

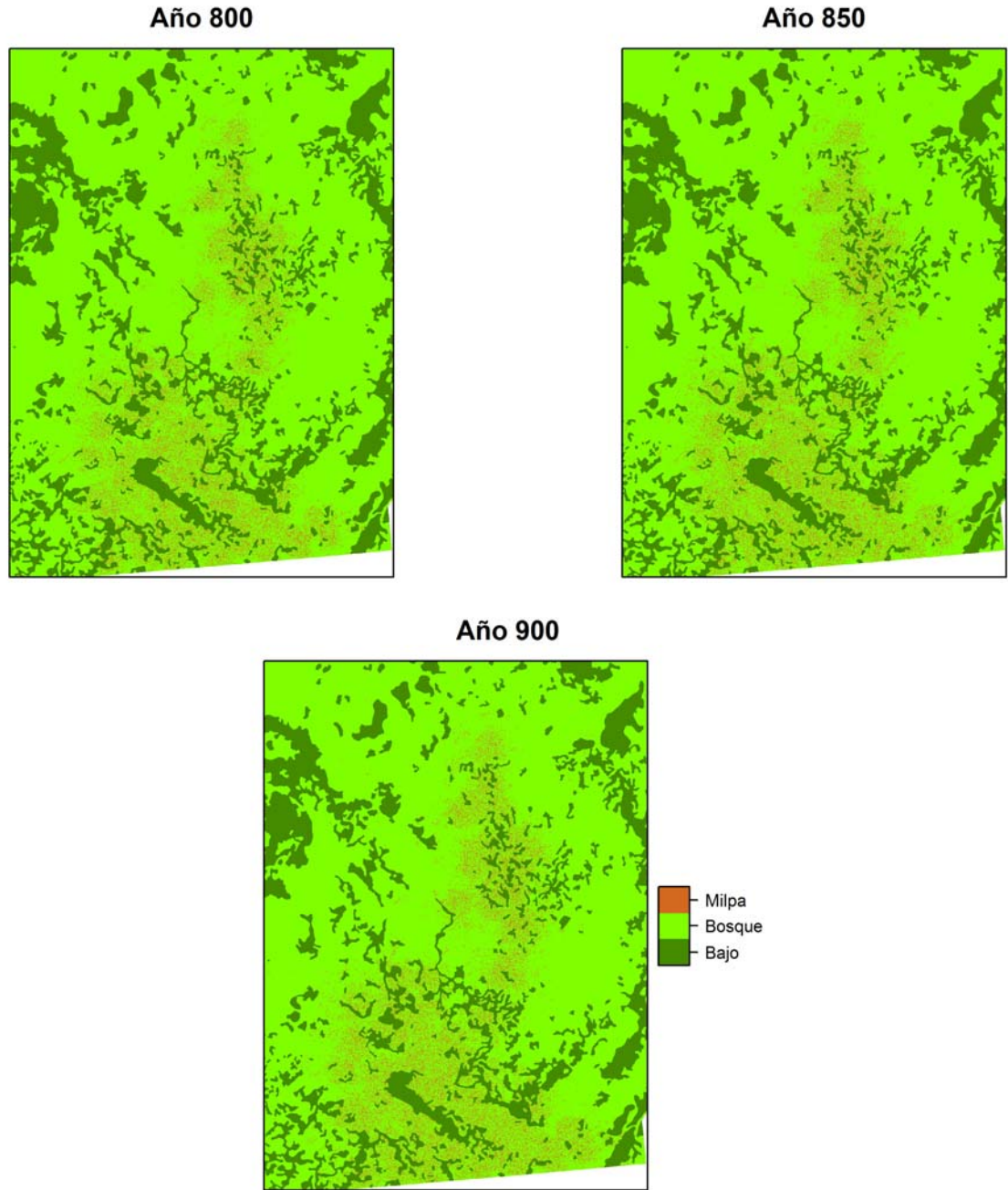


Figura 3-32: Paisaje con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q.

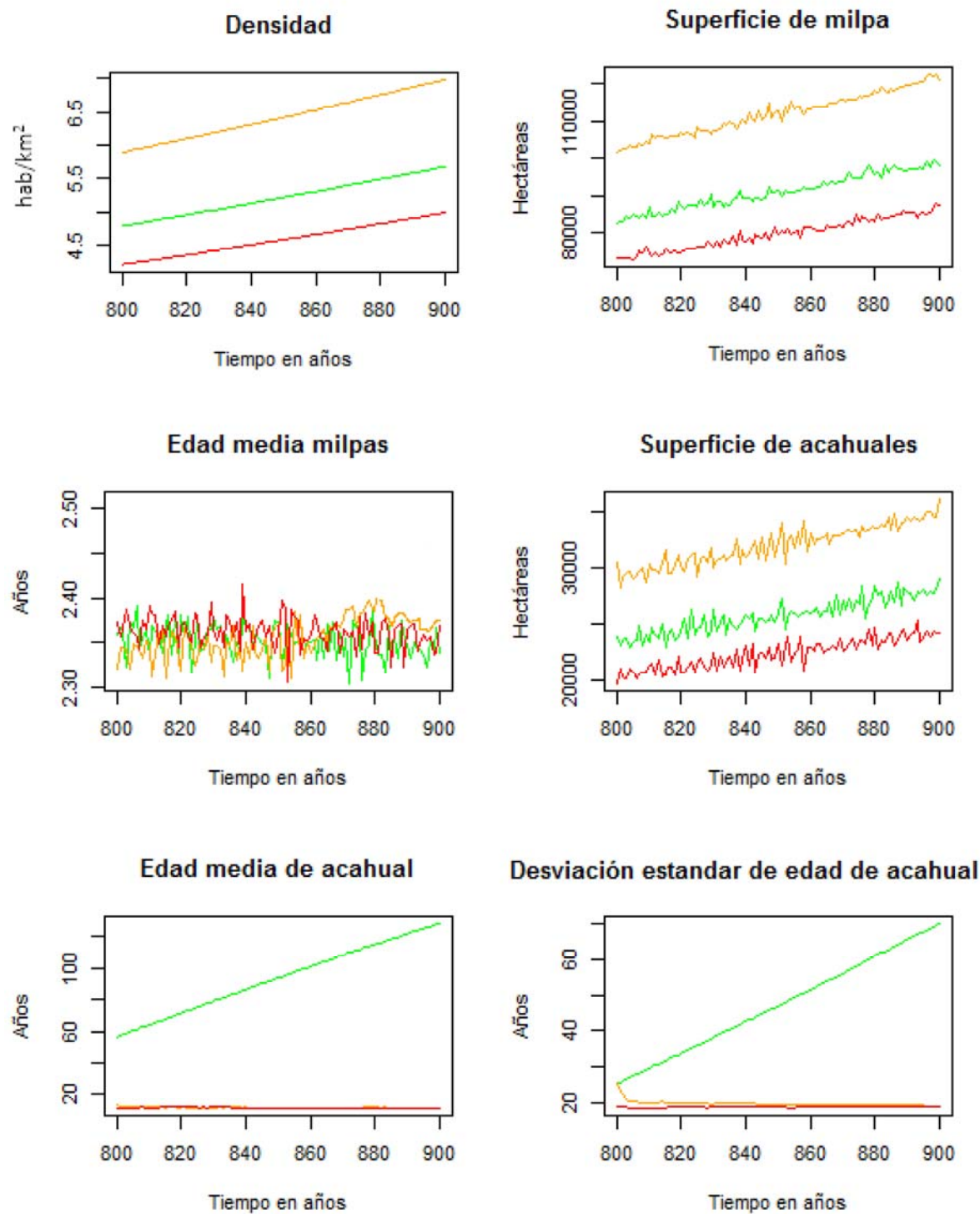


Figura 3-33: Escenario con asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).

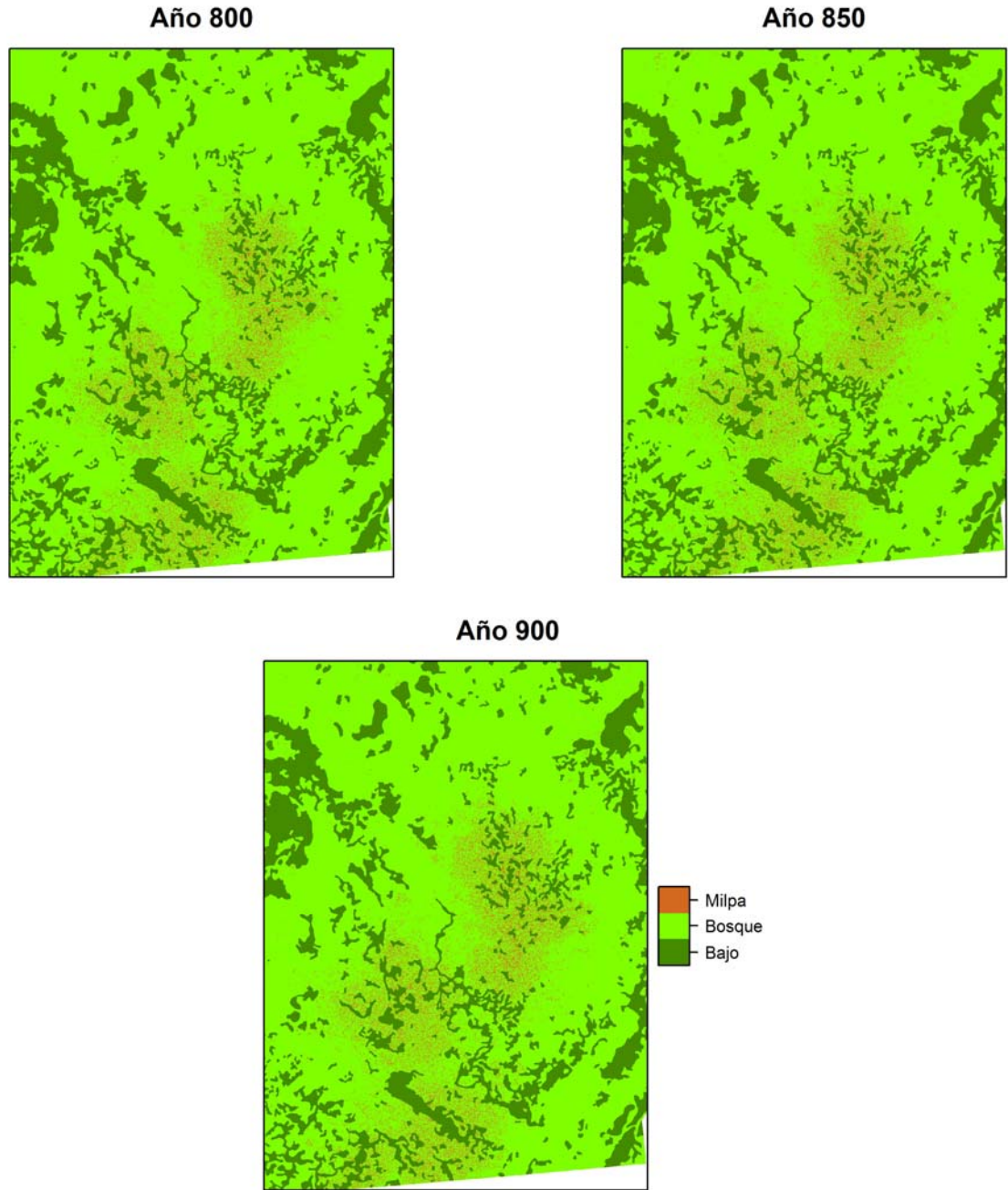


Figura 3-34: Paisaje con asentamientos asentamientos altamente concentrados alrededor de los centros y agricultura R-T-Q.

Anexo 2. Escenarios con agricultura Roza, Tumba y Quema y agricultura intensiva

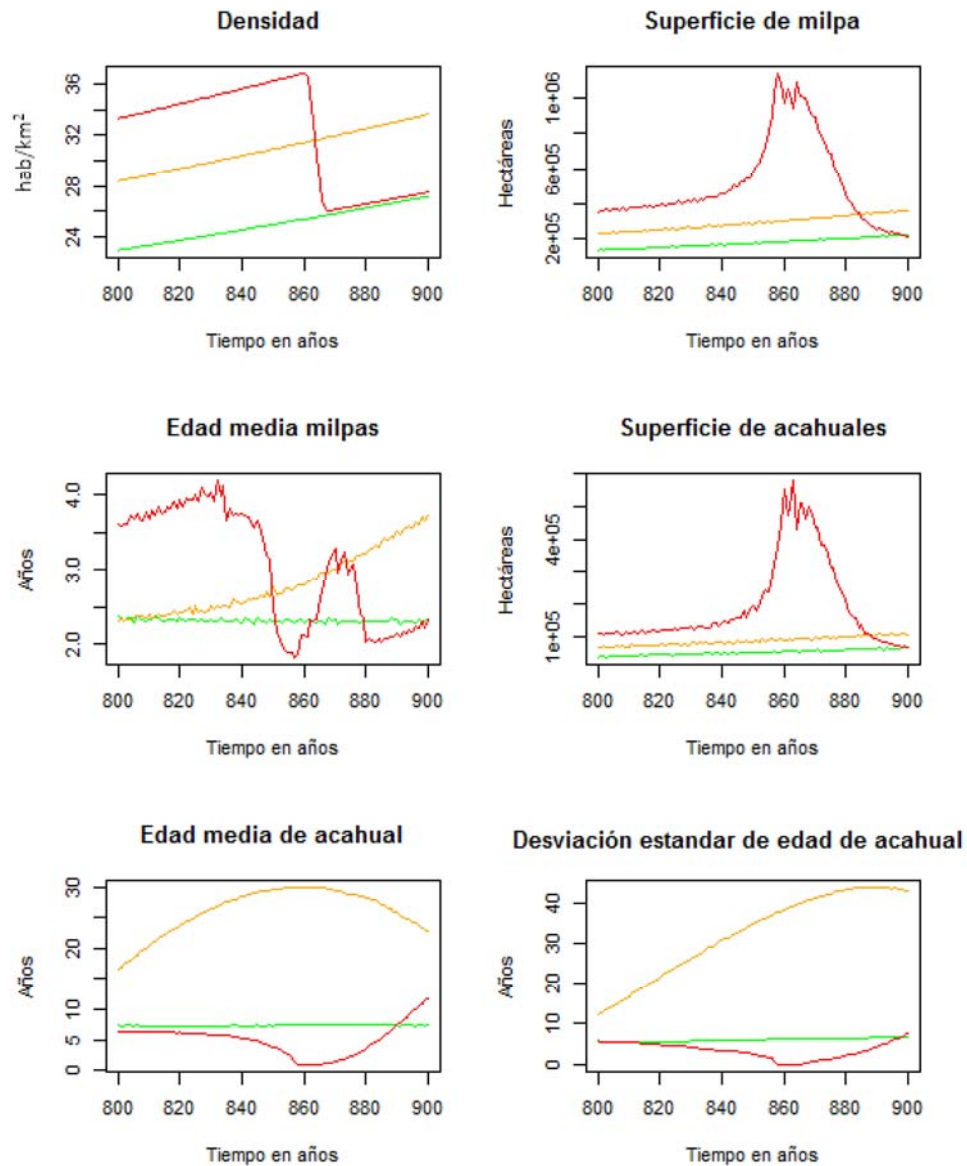


Figura 3-35: Escenario con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y con producción en bajos. En rojo (D3), amarillo (D2) y verde (D1).

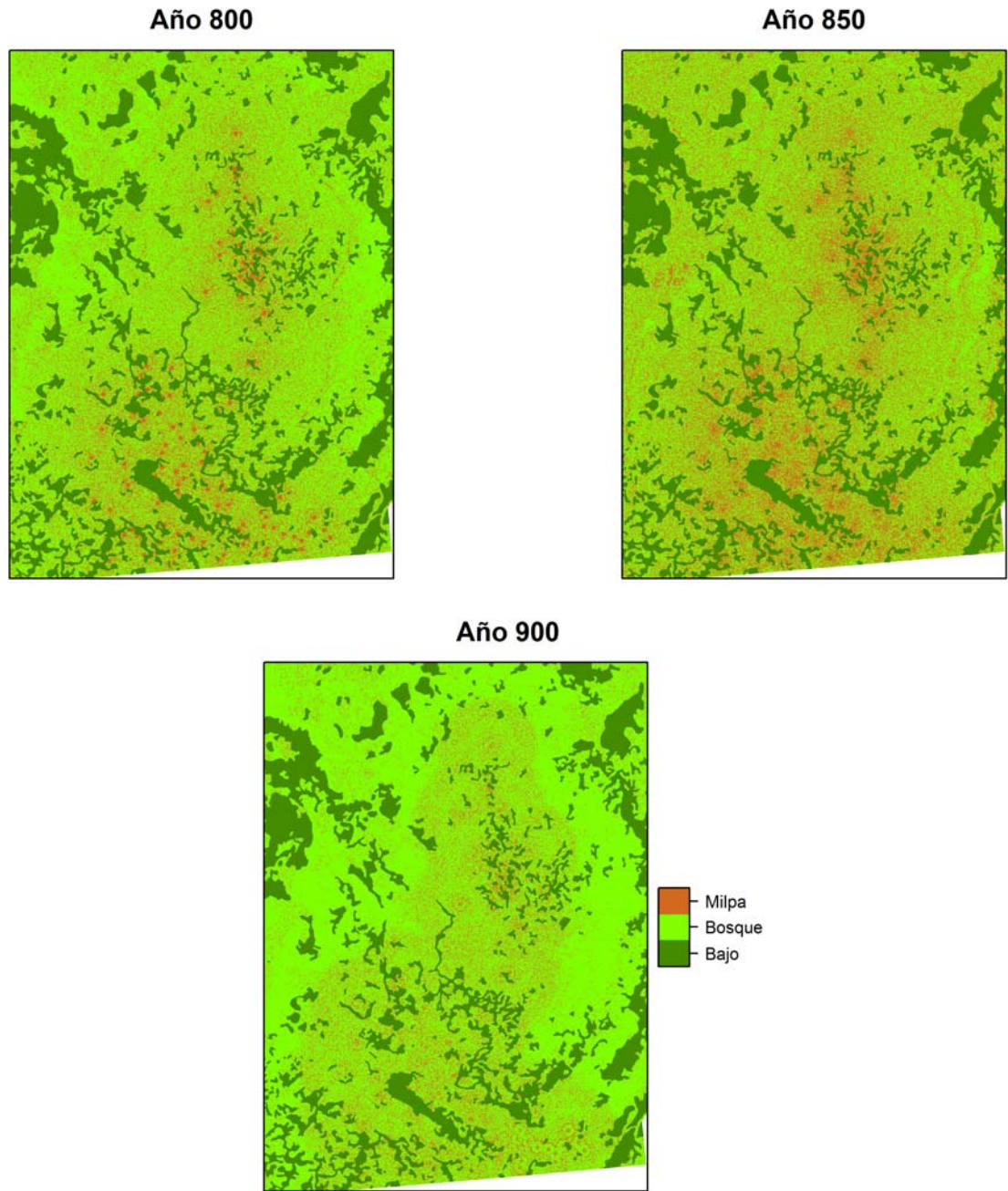


Figura 3-36: Paisaje con asentamientos medianamente concentrados alrededor de los centros y agricultura intensiva en bajos más R-T-Q.

Bibliografía

- ACEVEDO, P. Y DELIBES-MATEOS, M. Efectos de los cambios en los usos del suelo en las especies cinegéticas en el sur de España: repercusiones para la gestión. *Revista Ecosistemas* **22**(2):33–39 (2013)
- ADAMS, R.E. Swamps, canals, and the locations of ancient Maya cities. *Antiquity* **54**(212):206–214 (1980)
- AGUILAR-JIMÉNEZ, C.E., TOLÓN-BECERRA, A., Y LASTRA-BRAVO, X. Evaluación integrada de la sostenibilidad ambiental, económica y social del cultivo de maíz en Chiapas, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* **43**(1):155–174 (2011)
- ALVES, D.S. Y L SKOLE, D. Characterizing land cover dynamics using multi-temporal imagery. *International Journal of Remote Sensing* **17**(4):835–839 (1996)
- ANTOINE, P.P., SKARIE, R.L., Y BLOOM, P.R. The origin of raised fields near San Antonio, Belize: An alternative hypothesis. *Maya subsistence: Studies in memory of Dennis E. Puleston*. Academic Press, NY págs. 227–238 (1982)
- AOKI, K., SHIDA, M., Y SHIGESADA, N. Travelling wave Solutions for the spread of farmers into a region occupied by Hunter-Gatherers. *Theoretical Population Biology* **50**:1–17 (1996)
- ASHMORE, W., FOLAN, W.J., KINTZ, E., Y FLETCHER, L. *Coba a classic Maya Metropolis* (1984)
- ASTIER, M., MASERA, O., Y GALVÁN-MIYOSHI, Y. *Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional*. Sociedad Española de Agricultura Ecológica (2008)
- AXTELL, R.L., EPSTEIN, J.M., DEAN, J.S., GUMERMAN, G.J., SWEDLUND, A.C., HARBURGER, J., CHAKRAVARTY, S., HAMMOND, R., PARKER, J., Y PARKER, M. Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **99**(suppl 3):7275–7279 (2002)

- AYALA SÁNCHEZ, A., KRISHNAMURTHY, L., Y BASULTO GRANIEL, J. Leguminosas de cobertera para mejorar y sostener la productividad de maíz en el sur de Yucatán. *Terra Latinoamericana* **27**(1):63–69 (2009)
- BARTON, C.M., ULLAH, I., Y MITASOVA, H. Computational modeling and neolithic socioecological dynamics: a case estudy from southwest Asia. *American Antiquity* **75** (2):364–386 (2010)
- BARTON, C.M., ULLAH, I.I.T., BERGIN, S.M., MITASOVA, H., Y SARJOUGHIAN, H. Looking for the future in the past: Long-term change in socioecological systems. *Ecological Modelling* **241**:42–53 (2012)
- BEACH, T., DUNNING, N., LUZZADDER-BEACH, S., COOK, D., Y LOHSE, J. Impacts of the ancient Maya on soils and soil erosion in the central Maya Lowlands. *Catena* **65**:166–178 (2006)
- BEACH, T., LUZZADDER-BEACH, S., DUNNING, N., JONES, J., LOHSE, J., GUDERJAN, T., BOZARTH, S., MILLSPAUGH, S., Y BHATTACHARYA, T. A review of human and natural changes in Maya Lowland wetlands over the Holocene. *Quaternary Science Reviews* **28**(17):1710 – 1724 (2009). Quaternary Ice Sheet–Ocean Interactions and Landscape Responses
- BITHELL, M. Y BRASINGTON, J. Coupling agent-based models of subsistence farming with individual-based forest models and dynamic models of water distribution. *Environmental Modelling & Software* **24**(2):173–190 (2009)
- BORREGO, A., SALINAS MELGOZA, M., Y SKUTSCH, M. *El valor de las emisiones de carbono asociadas al sistema agrícola de roza, tumba y quema*. Síntesis nacionales (2015)
- BOYLE, J.F., GAILLARD, M.J., KAPLAN, J.O., Y DEARING, J.A. Modelling prehistoric land use and carbon budgets: A critical review. *The Holocene* **21**(5):715–722 (2011)
- BRAY, D.B., ELLIS, E.A., ARMIJO-CANTO, N., Y BECK, C.T. The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the Maya Zone in Quintana Roo, México. *Land Use Policy* **21**(4):333–346 (2004a)
- BRAY, D.B., ELLIS, E.A., ARMIJO-CANTO, N., Y BECK, C.T. The institutional drivers of sustainable landscapes: a case study of the Mayan Zone in Quintana Roo, Mexico. *Land Use Policy* **21**(4):333–346 (2004b)
- CAMACHO, M.T., PAEGELOW, M., Y GARCÍA MARTÍNEZ, P. Retrospective geomatic landscape modelling. A probabilistic approach. En M. Paegelow y M.T. Camacho Olmedo (editores), *Modelling Environmental Dynamics*, págs. 247–268. Springer, Heidelberg (2008)

- CARRASCO, R. Y COLON, M. El reino del Kaan y la antigua ciudad de Calakmul. *Arqueología Mexicana* **13**(75):40–47 (2005)
- CARRILLO-BASTOS, A., ISLEBE, G.A., TORRESCANO-VALLE, N., Y GONZÁLEZ, N.E. Holocene vegetation and climate history of central Quintana Roo, Yucatán Península, Mexico. *Review of Palaeobotany and Palynology* **160**(3):189–196 (2010)
- CASTELLA, J.C. Y VERBURG, P.H. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. *Ecological Modelling* **202**:410–420 (2007)
- CASTELLA, J.C., TRUNG, T.N., Y BOISSAU, S. Participatory simulation of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: the combined use of an agent-based model, a role-playing game, and a geographic information system. *Environmental Modelling & Software* **10**(1):1–27 (2005)
- CEIEG. *Índice de dispersión poblacional para Chiapas, notas metodológicas*. Dirección de Geografía, Estadística e Información Subsecretaría de Planeación, Presupuesto y Egresos Secretaría de Hacienda, Gobierno del Estado de Chiapas (2010)
- CHAN, K.M., SHAW, M.R., CAMERON, D.R., UNDERWOOD, E.C., Y DAILY, G.C. Conservation planning for ecosystem services. *PLoS Biol* **4**(11):e379 (2006)
- CHANG-MARTÍNEZ, L.A., MAS, J.F., TORRESCANO VALLE, N., URQUILJO TORRES, P.S., Y FOLAN, W.J. Modeling Historical Land Cover and Land Use: A Review from Contemporary Modeling. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **4**(4):1791–1812 (2015)
- CHASE, A.F. Y CHASE, D.Z. Scale and intensity in Classic period Maya agriculture: Terracing and settlement at the “garden city” of Caracol, Belize. *Culture, Agriculture, Food and Environment* **20**(2-3):60–77 (1998)
- CHOWDHURY, R.R. Driving forces of tropical deforestation: The role of remote sensing and spatial models. *Journal of Tropical Geography* **27**:82–101 (2006)
- CONKLIN, H.C. The Study of Shifting Cultivation. *Current Anthropology* **2**(1):27–61 (1961). <http://dx.doi.org/10.1086/200160>
- CRUZ LEÓN, A., MARTÍNEZ SALDAÑA, T., Y OMAÑA SILVESTRE, J.M. Fuentes de fuerza, diversidad tecnológica y rentabilidad de la producción de maíz en México. *CIENCIA ergo-sum* **11**(3):275–283 (2004)
- CUANALO, D.L.C. Y UICAB, R. Investigación participativa en la milpa sin quema. *Terra Latinoamericana* **23**(4):587–597 (2005)

- CUERVO-ROBAYO, A.P., TÉLLEZ-VALDÉS, O., GÓMEZ-ALBORES, M.A., VENEGAS-BARRERA, C.S., MANJARREZ, J., Y MARTÍNEZ-MEYER, E. An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology* **34**(7):2427–2437 (2014)
- CUEVAS, G. Y MAS, J.F. Land use scenarios: a communication tool with local communities. En M. Paegelow y M.T. Olmedo (editores), *Modelling Environmental Dynamics*, Environmental Science and Engineering, págs. 223–246. Springer Berlin Heidelberg (2008)
- CULBERT, T.P. Población, subsistencia y el Colapso de los Mayas del Clásico. En J.P. Laporte y H. Escobedo (editores), *Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, tomo VII, págs. 666–672. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (1995)
- CULBERT, T.P. Y RICE, D.S. Precolumbian population history in the Maya lowlands. (1990)
- CULBERT, T.P. *The Classic Maya Collapse*. University of New Mexico press. Albuquerque (1973)
- DE LA CASA, A. Modelo estadístico de pronóstico de rendimiento de maíz para la región semiárida de Córdoba basado en datos pluviométricos areales. *Agriscientia* **9**(2) (1992)
- DEAN, J.S., GUMERMAN, G.J., EPSTEIN, J.M., AXTELL, R., SEWDLUND, A.C., PARKER, M.T., Y MCCARROLL, S. Understanding Aansazi culture change through agent-based modeling. En T.A. Kohler y G.J. Gummerman (editores), *Dynamics of human and primate societies: Agent-based modeling of social and spatial processes*, págs. 179–206. Oxford University Press (2000)
- DEARING, J.A., BRAIMOH, A.K., REENBERG, A., TURNER, B.L., Y LEEUW, S.V.D. Complex land systems: the need for long time perspectives to assess their Future. *Ecology and Society* **15**(4):1–21 (2010)
- DEFRIES, R.S., FIELD, C.B., FUNG, I., COLLATZ, G.J., Y BOUNOU, L.. Combining satellite data and biogeochemical models to estimate global effects of human-induced land cover change on carbon emissions and primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles* **13**(3):803–815 (1999)
- DEMAREST, A.A. Y RICE, D.S. *The terminal classic in the Maya lowlands: Collapse, transition, and transformation*. Univ Pr of Colorado (2005)
- DEMAREST, A.A., RICE, P.M., Y RICE, D.S. *El Clásico Terminal en las tierras Bajas Mayas: Colapso, Transición y Transformación*. FAMSI (2005)
- DENEVAN, W. Y TURNER II, B.L. Forms functions and associations of raised fields in the old world tropics. *Journal of Tropical Geography* **39**:24–33 (1974)

- DENEVAN, W.M. Una perspectiva histórica sobre el descubrimiento del Campo Elevados (Camellones) prehipánicos. En F. Valdez (editor), *Agricultura ancestral camellones y albarradas. Contexto social, usos y retos del pasado y del presente.*, pág. 363. IFEA, Quito, Ecuador (2006)
- DIAMOND, J. Colapso. Porqué unas sociedades perduran y otras desaparecen (2006)
- DIAMOND, J.M. *Collapse: how societies choose to fail or succeed.* Penguin Books (2005)
- DOMÍNGUEZ-CARRASCO, M.D.R. Y FOLAN HIGGINS, W.J. Ceramic Traditions in the Calakmul Region: An Indicator of the Movement of Ideas or Populations? En *Archaeology and Bioarchaeology of Population Movement among the Prehispanic Maya*, págs. 13–24. Springer (2015)
- DOMÍNGUEZ, M.D.R. Y FOLAN, W.J. Calakmul, México: Aguadas, bajos, precipitación y asentamiento en el Petén Campechano. En J.P. Laporte y H. Escobedo (editores), *Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, tomo IX, págs. 147–173. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (1996)
- DOMÍNGUEZ-CARRASCO, MA. DEL ROSARIO, E.P.M.E. Y FOLAN, W.J. Los materiales arqueológicos de Oxpemul, Cmapeche y su contexto regional. *Los Investigadores de la Cultura Maya* **18**:253–268 (2010)
- DOMÍNGUEZ-CARRASCO, M.D.R. Y FOLAN, W.J. Calakmul, Mexico: Aguadas, bajos, precipitación y asentamientos en el Petén Campechano. tomo IX, págs. 147–173 (1996)
- DOMÍNGUEZ-CARRASCO, M.D.R. Y FOLAN HIGGINS, W.J. Calakmul, Campeche: Un análisis sociopolítico de su centro urbano y su estado regional. *Los Investigadores de la Cultura Maya* **14 (6-2)**:213 (1998)
- DOUGLAS, P.M., DEMAREST, A.A., BRENNER, M., Y CANUTO, M.A. Impacts of Climate Change on the Collapse of Lowland Maya Civilization. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **44**:613–645 (2016)
- DUNNING, N.P. Y BEACH, T. Stability and instability in prehispanic Maya landscapes. *Imperfect balance* págs. 179–202 (2000)
- DURÁN-MEDINA, E., MAS, J.F., Y VELÁZQUEZ, A. Cambios en las coberturas de vegetación y usos de suelo en regiones con manejo forestal comunitario y áreas naturales protegidas de México. En D. Bray, L. Merino, y D. Barry (editores), *Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de los paisajes forestales*, págs. 267–299. SEMARNAT, INE, Instituto de Geografía-UNAM (2007)

- ESTÉVEZ, Y. Y PAJÓN, J.M. Consideraciones del análisis palinológico en reconstrucciones paleoambientales aplicadas a las investigaciones arqueológicas. (2006)
- ETTER, A. Las transformaciones de uso de la tierra y los ecosistemas durante el período colonial en Colombia (1500-1800). En A. Meisel y M.T. Ramírez (editores), *La economía colonial de nueva granada*, pág. 48. TM Editores y Banco de la República, Bogotá, Bogotá (2013)
- ETTER, A., MCALPINE, C., Y POSSINGHAM, H. Historical patterns and drivers of landscape change in Colombia since 1500: a regionalized spatial approach. *Annals of the Association of American Geographers* **98**(1):2–23 (2008)
- FAEGRI, K., KALAND, P.E., KRZYWINSKI, K. *et al. Textbook of pollen analysis*. Ed. 4. John Wiley & Sons Ltd. (1989)
- FAO. Guía para la descripción de suelos (2009a)
- FAO. *La FAO en México. Más de 60 años de cooperación 1945-2009*. Agroanálisis A.C. (2009b)
- FAO, O. *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2014-2023*. OECD Publishing (2014)
- FAUST, B.B. Maya environmental successes and failures in the Yucatan, Peninsula. *Environmental Science & Policy* **4**:153–169 (2001)
- FEDICK, S.L. Land evaluation and ancient Maya land use in the Upper Belize River area, Belize, Central America. *Latin American Antiquity* págs. 16–34 (1995)
- FEDICK, S.L. Land Evaluation and Ancient Maya Land Use in the Upper Belize River Area, Belize, Central America. *Latin American Atiquity* **6** (1):16–34 (2012)
- FERGUSON, B.G. Y GRIFFITH, D.M. Tecnología agrícola y conservación biológica en El Petén, Guatemala. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología* (72):72–85 (2004)
- FISHER, C.T., FEINMAN, G.M., Y EDITORS, G. In Focus: Landscapes over Time: Resilience, Degradation, and Contemporary Lessons. *American Anthropologist* **107**:62–69 (2005)
- FOLAN, W.J., GUNN, J., EATON, J.D., Y PATCH, R.W. Paleoclimatological patterning in southern Mesoamerica. *Journal of Field Archaeology* **10**(4):453–468 (1983)
- FOLAN, W.J., MARCUS, J., PINCEMIN, S., CARRASCO, M.D.R.D., FLETCHER, L., Y LÓPEZ, A.M. Calakmul: New data from an ancient Maya capital in Campeche, Mexico. *Latin American Antiquity* págs. 310–334 (1995)

- FOLAN, W.J., FLETCHER, L.A., HAU, J.M., Y FOLAN, L.F. *Las Ruinas de Calakmul, Campeche, México: Un lugar central y su paisaje*, tomo Monografías y 32 mapas encajonadas. UAC, Campeche (2000)
- FOLAN, W.J., GONZÁLEZ HEREDIA, R., MORALES LÓPEZ, A., DOMÍNGUEZ-CARRASCO, M.D.R., ZAMORA CRESENCIO, P., BARNES, E.B., ROBICHAUX, H., ANAYA HERNÁNDEZ, A., GUNN, J.D., Y PRUETT, C. Las ruinas de Oxpemul: un sitio fortificado en la frontera entre el Petén Campechano y el Río Bec. *Estudios de cultura maya* **34**:11 – 44 (2009)
- FOLAN, W.J., CARRASCO-DOMÍNGUEZ, M.D.R., GUNN, J.D., MORALES-LÓPEZ, A., HEREDIA, R.G., GARCÍA, G.V., Y TORRESCANO VALLE, N. Calakmul: Power, Perseverance, and Persistence. En *Archaeology and Bioarchaeology of Population Movement among the Prehispanic Maya*, págs. 37–50. Springer (2015)
- FOLEY, J.A., DEFRIES, R., ASNER, G.P., BARFORD, C., BONAN, G., CARPENTER, S.R., CHAPIN, F.S., COE, M.T., DAILY, G.C., GIBBS, H.K., HELKOWSKI, J.H., HOLLOWAY, T., HOWARD, E.A., KUCHARIK, C.J., MONFREDA, C., PATZ, J.A., PRENTICE, I.C., RAMANKUTTY, N., Y SNYDER, P.K. Global consequences of land use. *Science* **309**(5734):570–4 (2005)
- FRANCISCO NICOLÁS, N., TURRENT FERNÁNDEZ, A., OROPEZA MOTA, J., MARTÍNEZ MENES, M., Y CORTÉS FLORES, J. Pérdida de suelo y relación erosión-productividad en cuatro sistemas de manejo del suelo. *Terra latinoamericana* **2**(24):253–260 (2006)
- GAILLARD, M.J., SUGITA, S., MAZIER, F., KAPLAN, J.O., TRONDMAN, A.K., BROSTRÖM, A., HICKLER, T., KJELLSTRÖM, E., KUNES, P., LEMMEN, C., OLOFSSON, J., SMITH, B., Y STRANDBERG, G. Holocene land-cover reconstructions for studies on land cover-climate feedbacks. *Climate of the Past Discussions* **6**:307–346 (2010)
- GAILLARD, M.J., SUGITA, S., BUNTING, M.J., MIDDLETON, R., BROSTRÖM, A., CASELDINE, C., GIESECKE, T., HELLMAN, S.E.V., HICKS, S., HJELLE, K., LANGDON, C., NIELSEN, A.B., POSKA, A., VON STEDINGK, H., Y VESKI, S. The use of modelling and simulation approach in reconstructing past landscapes from fossil pollen data: a review and results from the POLLANDCAL network. *Vegetation History and Archaeobotany* **17**(5):419–443 (2008)
- GALICIA, L., ROMERO, A.G., MENDOZA, L.G., Y RAMÍREZ, M.I. Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. *Ciencia* págs. 50–60 (2007)
- GALLARETA-NEGRÓN, T. Sequía y colapso de las ciudades mayas del Puuc. *INAJ* **11**:13–21 (2000)

- GARCÍA BORJA, A. Evolución temporal de rendimientos de cultivos y su relación con la señal climática en Tarragona (2015)
- GARCÍA DE MIRANDA, E. Y GARCÍA, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Informe técnico (1973)
- GARZA MERODIO, G.G. Climatología histórica: las ciudades mexicanas ante la sequía (siglos XVII al XIX). *Investigaciones geográficas* (63):77–92 (2007)
- GEIST, H.J. Y LAMBIN, E.F. *What drives tropical deforestation?. A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence*. Lucc Report. Ciaco Printshop, University of Louvain (2001)
- GEOGHEGAN, J., VILLAR, S.C., KLEPEIS, O., MENDOZA, P., OGNEVA, M., HIMMELBERGER, Y., CHOWDHURY, R., TURNER, B. L., I., Y VANCE, C. Modeling tropical deforestation in the southern Yucatán peninsular region: comparing survey and satellite data. *Agriculture Ecosystems & Environment* **85**:25–46 (2001)
- GEOVANNINI, A.H. Y MARTÍNEZ-DÁVILA, A. La ocupación maya en la periferia de la zona monumental de Calakmul. *Los Investigadores de la Cultura Maya* **16** (1):336 (2008)
- GERBER, P., STEINFELD, H., HENDERSON, B., MOTTET, A., OPIO, C., DIJKMAN, J., FALCUCCI, A., Y TEMPIO, G. *Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación*. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), Roma (2013)
- GILL, R.B. *The great Maya droughts: water, life, and death*. UNM Press (2001)
- GOLDEWIJK, K.K. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE Database. *Global Biogeochemical Cycles* **15**(2):417–433 (2001)
- GOLDEWIJK, K.K. Y RAMANKUTTY, N. Land cover change over the three centuries due to human activities: The availability of new global data sets. *GeoJournal* **61**:335–344 (2004)
- GRIFFIN, A.F. Y STANISH, C. *An Agent-based Model of Prehistoric Settlement Patterns and Political Consolidation in the Lake Titicaca Basin of Peru and Bolivia*. eScholarship (2007)
- GRIMM, E. Tilia: Version 1.5.12. *Research and Collections Centre, Springfield* (2011)
- GUNN, J.D., FOLAN, H.R., Y ROBICHAUX, H.R. A Landscape Analysis of the Candelaria Watershed in Mexico. Insights into Paleoclimates Affecting Upland Horticulture in the Southern Yucatan Peninsula, Semi-Karst. *Geoarchaeology: An International Journal* **10** (1):3–42 (1995)

- GUNN, J.D. Y FOLAN, W.J. Three rivers: Subregional variations in earth system impacts in the southwestern Maya Lowlands (Candelaria, Usumacinta, and Champoton Watersheds). *The way the wind blows: Climate, history, and human action* págs. 263–270 (2000)
- GUTIÉRREZ, M.D.G.Z. De la agroecología Maya a la arqueología demográfica: ¿Cuántas casas por familia? *Estudios de cultura Maya* **XXXVIII**:97–120 (2009)
- HAGEN-ZANKER, A. An improved Fuzzy Kappa statistic that accounts for spatial autocorrelation. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* **23**(1):61–73 (2009)
- HANSEN, M.C., POTAPOV, P.V., MOORE, R., HANCHER, M., TURUBANOVA, S.A., TYUKAVINA, A., THAU, D., STEHMAN, S.V., GOETZ, S.J., LOVELAND, T.R., KOMMAREDDY, A., EGOROV, A., CHINI, L., JUSTICE, C.O., Y TOWNSHEND, J.R.G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* **342**(6160):850–853 (2013)
- HARRISON, P.D. The rise of the bajos and the fall of the Maya. *Social Process in Maya Prehistory: Studies in Honour of Sir Eric Thompson*, Academic Press, London págs. 470–508 (1977)
- HARRISON, P.D. Y TURNER II, B.L. *Pre-Hispanic Maya Agriculture*. University of New Mexico Press (1978)
- HAUG, G.H., GÜNTHER, D., PETERSON, L.C., SIGMAN, D.M., HUGHEN, K.A., Y AESCHLIMANN, B. Climate and the Collapse of Maya civilization. *Science* **299** (2003)
- HAVILAND, W.A. Tikal, Guatemala and Mesoamerican urbanism. *World archaeology* **2**(2):186–198 (1970)
- HAYASHIDA, F.M. *Archaeology, Ecological, History, and Conservation*. University of Kansas, Pennsylvania (2005)
- HECKBERT, S. MayaSim: an agent-based model of the ancient Maya social-ecological system. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* **16**(4):11 (2013)
- HERMES, B., KOSZKUL, W., Y CALDERÓN, Z. Los Mayas y la cultura teotihuacana: Descubrimientos de Nakum, Petén. En *XIX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, págs. 895–910 (2005)
- HODELL, D.A., CURTIS, J.H., Y BRENNER, M. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature* **375**:391–394 (1995)

- HOUET, T., LOVELAND, T.R., HUBERT-MOY, L., GAUCHEREL, C., NAPTON, D., BARNES, C.A., Y SAYLER, K. Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. *Landscape Ecology* **10**:18 (2009)
- HOUGHTON., R. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990. *Tellus* **51B**:298–313 (1999)
- HURTT, G.C., FROLKING, S., FEARON, M.G., MOORE, B., SHEVLIAKOVA, E., MALYSHEV, S., PACALA, S.W., Y HOUGHTON, R.A. The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. *Global Change Biology* **12**(7):1208–1229 (2006)
- HURTT, G.C., CHINI, L.P., FROLKING, S., BETTS, R., FEDDEMA, J., FISCHER, G., FISK, J., HIBBARD, K., HOUGHTON, R., JANETOS, A. *et al.* Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic change* **109**(1-2):117–161 (2011)
- INIFAP-CONABIO. Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP)- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). *Edafología* pág. Escalas 1:250000 y 1:1000000 (1995)
- IUSS-WRB. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. Informe técnico, FAO (2007)
- JARAMILLO, V., GARCÍA-OLIVA, F., Y MARTÍNEZ-YRÍZAR, A. La selva seca y las perturbaciones antrópicas en un contexto funcional. *Diversidad, Amenazas y Áreas Prioritarias para la Conservación de las Selvas Secas del Pacífico de México* págs. 235–250 (2010)
- JASSO, I.M. Y BECERRA, P.A.V. La alimentación en México: un estudio a partir de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares. *Notas: Revista de Información y Análisis* **21**:26–37 (2003)
- KAPLAN, J.O., KRUMHARDT, K.M., Y ZIMMERMANN, N. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quaternary Science Reviews* **28**(27):3016–3034 (2009)
- KAPLAN, J.O., KRUMHARDT, K.M., Y ZIMMERMANN, N.E. The effects of land use and climate change on the carbon cycle of Europe over the past 500 years. *Global Change Biology* **18**(3):902–914 (2012)
- KENNETT, D.J. Y BEACH, T.P. Archeological and environmental lessons for the Anthropocene from the Classic Maya collapse. *Anthropocene* **4**:88–100 (2013)

- KHOI, D.D. Y MURAYAMA, Y. Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam. *Remote Sensing* **2**(5):1249–1272 (2010)
- KOHLER, T.A., GUMERMAN, G.J., Y REYNOLDS, R.G. Simulating ancient societies. *Scientific American* **293**(1):76–84 (2005)
- KOHLER, T.A., BOCINSKY, R.K., COCKBURN, D., CRABTREE, S.A., VARIEN, M.D., KOLM, K.E., SMITH, S., ORTMAN, S.G., Y KOBTI, Z. Modelling prehispanic pueblo societies in their ecosystems. *Ecological Modelling* (2012a)
- KOHLER, T.A., COCKBURN, D., HOOPER, P.L., BOCINSKY, R.K., Y KOBTI, Z. The coevolution of group size and leadership: An agent-based public goods model for prehispanic Pueblo societies. *Advances in Complex Systems* **15**(01n02):1150007 (2012b)
- LAMBIN, E.F., TURNER, B., GEIST, H.J., AGBOLA, S.B., ANGELSEN, A., BRUCE, J.W., COOMES, O.T., DIRZO, R., FISHER, G., FOLKE, C., GEORGE, P., HOMEWOOD, K., IMBERNON, J., LEEMANS, R., LI, X., MORAN, E.F., MORTIMORE, M., RAMAKRISHNAN, P., RICHARDS, J.F., SKANES, H., STEFFENT, W., STONE, G.D., SVEDINV, U., VELDKAMP, T.A., VOGEL, C., Y XU, J. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* **11**:261–269 (2001)
- LAMBIN, E.F., GEIST, H.J., Y LEPERS, E. Dynamics of Land-Use and Land-Cover Change in Tropical Regions. *Annual Review of Environment and Resources* **28**(1):205–241 (2003)
- LAURANCE, W.F. Y WILLIAMSON, G.B. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. *Conservation Biology* **15**(6):1529–1535 (2001)
- LEMMEN, C. World distribution of land cover changes during Pre- and Protohistoric Times and estimation of induced carbon releases. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* **4**:303–312 (2010)
- LEMMEN, C. Y KHAN, A. A Simulation of the Neolithic Transition in the Indus Valley. *Climates, Landscapes, and Civilizations* **198**:107–114 (2012)
- LENTZ, D.L., DUNNING, N.P., SCARBOROUGH, V.L., MAGEE, K.S., THOMPSON, K.M., WEAVER, E., CARR, C., TERRY, R.E., ISLEBE, G., TANKERSLEY, K.B. *et al.* Forests, fields, and the edge of sustainability at the ancient Maya city of Tikal. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**(52):18513–18518 (2014)
- LHUILIER, A.R. *Los antiguos Mayas*. Tercera edición. Fondo de cultura económica (1981)

- LI, X., DODSON, J., ZHOU, J., Y ZHOU, X. Increases of population and expansion of rice agriculture in Asia, and anthropogenic methane emissions since 5000BP. *Quaternary International* **202**(1-2):41–50 (2009)
- LYELL, C. Principles Of Geology Vol. 1 (1835)
- MACMILLAN, W. Y HUANG, H.Q. An agent-based simulation model of a primitive agricultural society. *Geoforum* **39**(2):643–658 (2008)
- MARTÍNEZ, E. Y LEAL, C.G. La vegetación de Calakmul, Campeche, México: clasificación, descripción y distribución (2002)
- MARTÍNEZ MÉNEZ, M. Estimación de la Erosión del Suelo. Informe técnico, SAGARPA-INCA, México (2005)
- MAS, J.F. Puede la modelación espacial ayudarnos a entender los procesos de cambio de cobertura/uso de suelo y de degradación ambiental? Informe técnico, CIGA, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México (2012)
- MAS, J.F., VELÁZQUEZ, A., DÍAZ GALLEGOS, J.R., MAYORGA-SAUCEDO, R., ALCÁNTARA, C., BOCCO, G., CASTRO, R., FERNÁNDEZ, T., Y PÉREZ VEGA, A. Assessing land use/cover changes: a nationwide multirate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **5**:249–261 (2004)
- MAS, J.F., KOLB, M., HOUET, T., PAEGELOW, M., Y OLMEDO, M.T.C. Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura / uso del suelo. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR* págs. 5801–5808 (2011)
- MAS, J.F., PÉREZ-VEGA, A., Y CLARKE, K.C. Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices. *Ecological Complexity* **11**:38–45 (2012)
- MAS, J.F., KOLB, M., PAEGELOW, M., CAMACHO OLMEDO, M.T., Y HOUET, T. Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software* **51**:94–111 (2014)
- MATHENY, R.T. *Investigations at Edzna, Campeche, Mexico*, tomo 2. New World Archaeological Foundation, Brigham Young University (1983)
- MCEVEDY, C. Y JONES, R. *Atlas of world population history*. Penguin Books Ltd, Harmondsworth, Middlesex, England. (1978)

- MCNEIL, C.L., BURNEY, D.A., Y BURNEY, L.P. Evidence disputing deforestation as the cause for the collapse of the ancient Maya polity of Copan, Honduras. *PNAS* **107(3)**:1017–1022 (2010)
- MEDINA-ELIZALDE, M., BURNS, S.J., LEA, D.W., ASMEROM, Y., VON GUNTEN, L., POLYAK, V., VUILLE, M., Y KARMALKAR, A. Collapse of Classic Maya Civilization Related to Modest Reduction in Precipitation. *Science* **24**:956–959 (2012)
- MERRITT, W.S., LETCHER, R.A., Y JAKEMAN, A.J. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software* **18(8)**:761–799 (2003)
- MOORE, P.D., WEBB, J.A., COLLISON, M.E. *et al. Pollen analysis*. Blackwell scientific publications (1991)
- MÜLLER, R., LARREA-ALCÁZAR, D.M., CUÉLLAR, S., Y ESPINOZA, S. Causas directas de la deforestación reciente (2000-2010) y modelado de dos escenarios futuros en las tierras bajas de Bolivia. *Ecología en Bolivia* **49(1)**:20–34 (2014)
- MURPHY, J.T. Exploring complexity with the Hohokam Water Management Simulation: A middle way for archaeological modeling. *Ecological Modelling* **241**:15–29 (2012)
- NAKAGAWA, T., BRUGIAPAGLIA, E., DIGERFELDT, G., REILLE, M., BEAULIEU, J.L.D., Y YASUDA, Y. Dense-media separation as a more efficient pollen extraction method for use with organic sediment/deposit samples: comparison with the conventional method. *Boreas* **27(1)**:15–24 (1998)
- NAROLL, R. Floor area and settlement population. *American antiquity* págs. 587–589 (1962)
- NOOREN, K., HOEK, W.Z., VAN DER PLICHT, H., SIGL, M., VAN BERGEN, M.J., GALOP, D., TORRESCANO-VALLE, N., ISLEBE, G., HUIZINGA, A., WINKELS, T. *et al.* Explosive eruption of El Chichón volcano (Mexico) disrupted 6th century Maya civilization and contributed to global cooling. *Geology* **45(2)**:175–178 (2017)
- NRC. *Advancing Land Change Modeling: Opportunities and Research Requirements*. The National Academies Press (2014)
- OCHOA-GAONA, S., VÁZQUEZ-HERNÁNDEZ, F., DE JONG, B.H., Y GARCÍA, F.D.G. Pérdida de diversidad florística ante un gradiente de intensificación del sistema agrícola de roza-tumba-quema: un estudio de caso en la Selva Lacandona, Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* (81):65–80 (2007)
- OECD/FAO. *Perspectivas Agrícolas 2014*. OECD Publishing (????)

- OLOFSSON, J. Y HICKLER, T. Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6,000 years. *Vegetation History and Archaeobotany* **17**(5):605–615 (2008)
- OVERMARS, K.P., VERBURG, P.H., Y VELDKAMP, T. Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model. *Land Use Policy* **24**(3):584–599 (2007)
- PAEGELOW, M. Y CAMACHO OLMEDO, M. Modelling environmental dynamics. Advances in geomatic simulations (2008a)
- PAEGELOW, M. Y CAMACHO OLMEDO, M. Modelling environmental dynamics. Advances in geomatic simulations (2008b)
- PAEGELOW, M., OLMEDO, M.T.C., Y TORIBIO, J.M. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus* **3**:22–44 (2003)
- PAEGELOW, M. Y OLMEDO, M.C. Modelos de simulacion espacio-temporal y teledeteccion: el método de la segmentacion para la cartografía cronologica de usos del suelo. *Serie Geográfica* (16):19–34 (2010)
- PAEGELOW, M., CAMACHO OLMEDO, M.T., MAS, J.F., HOUET, T., Y PONTIUS JR, R.G. Land change modelling: moving beyond projections. *International Journal of Geographical Information Science* **27**(9):1691–1695 (2013)
- PALACIOS-CHÁVEZ, R., LUDLOW-WIECHERS, B., Y VILLANUEVA, G. Flora palinológica de Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an. *Quintana Roo, México: Quintana Roo, México, Centro de Investigaciones de Quintana Roo (CICRO)* (1991)
- PARKER, D.C., HESSL, A., Y DAVIS, S.C. Complexity, land-use modeling, and the human dimension: fundamental challenges for mapping unknown outcome spaces. *Geoforum* **39**(789):789–804 (2008)
- PARKER, D.C., BERGHER, T., Y MANSON, S.M. Agent-based models of land-use and land-cover change págs. 4–7 (2001)
- PARKER, D.C., MANSON, S.M., JANSSEN, M.A., HOFFMANN, M.J., Y DEADMAN, P. Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review. *Annals of the Association of American Geographers* **93**(2):314–337 (2003)
- PATTERSON, M.A., SARSON, G., SANRSON, H., Y SHUKUROV, A. Modelling the Neolithic transition in a heterogeneous environment. *Journal of Archaeological Science* **37**:2929–2937 (2010)

- PEETERS, H. Modelling Mesolithic-Neolithic Land-Use Dynamics and Archaeological Heritage Management: An Example from the Flevoland Polders (The Netherlands). En F. Niccolucci y S. Hermon (editores), *Beyond the artifact: Digital interpretation of the past*. Archaeolingua, Budapest (2010)
- PÉREZ-VEGA, A., MAS, J.F., Y LIGMANN-ZIELINSKA, A. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software* **29**(1):11–23 (2012)
- PETERSON, L.C. Y HAUG, G.H. Climate and the collapse of Maya civilization. *American Scientist* **93**(4):322–329 (2005)
- PHILLIPS, S.J., ANDERSON, R.P., Y SCHAPIRE, R.E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling* **190**(3):231–259 (2006)
- POHL, M. *Ancient Maya Wetland Agriculture: Excavations on Albion Island, Northern Belize*. 2. Westview Press (1990)
- PONGRATZ, J., REICK, C., RADDATZ, T., Y CLAUSSEN, M. A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles* **22**(3) (2008)
- PONTIUS, R. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **66**(8):1011–1016 (2000)
- PONTIUS, R.G., BOERSMA, W., CASTELLA, J.C., CLARKE, K., DE NIJS, T., DIETZEL, C., DUAN, Z., FOTSING, ERIC GOLDSTEIN, N., KOK, K., KOOMEN, E., LIPPITT, C.D., MCCONNELL, W., MOHD SOOD, A., PIJANOWSKI, B., PITHADIA, S., SWEENEY, S., TRUNG, T.N., VELDKAMP, A.T., Y VERBURG, P.H. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *The Annals of Regional Science* **42**(1):11–37 (2008)
- POSKA, A., SEPP, E., VESKI, S., Y KOPPEL, K. Using quantitative pollen-based land-cover estimations and a spatial CA-Markov model to reconstruct the development of cultural landscape at Rõuge, South Estonia. *Vegetation History and Archaeobotany* **17**(5):527–541 (2007)
- POSKA, A., SEPP, E., VESKI, S., Y KOPPEL, K. Using quantitative pollen-based land-cover estimations and a spatial CA-Markov model to reconstruct the development of cultural landscape at Rõuge, South Estonia. *Vegetation History and Archaeobotany* **17**(5):527–541 (2008)
- PÉREZ-SALICRUP, D. Y FOSTER, D. Forest types in southern Yucatán, Mexico. *Ecological Society of America Annual Meeting, Snowbird, UT* **154**(3):323 (2000)

- RAMANKUTTY, N. Y FOLEY, J.A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700-1992. *Global Biogeochemical Cycles* **13** (4):997–1027 (1999)
- REDMAN, C.L. *Los Orígenes de la civilización. Desde los primeros agricultores hasta la sociedad urbana en el Próximo Oriente*. Editorial Crítica, Barcelona (1990)
- REIMER, P.J., BARD, E., BAYLISS, A., BECK, J.W., BLACKWELL, P.G., BRONK RAMSEY, C., BUCK, C.E., CHENG, H., EDWARDS, R.L., FRIEDRICH, M. *et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP (2013)
- RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G., MCCOOL, D., Y YODER, D. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, tomo 703. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service Washington (1997)
- ROBERTS, N. *The Holocene: an environmental history*. John Wiley & Sons (1998)
- ROFFE, T.G., LIGTENBERG, A., Y ROLF, A. Modelo para el pronóstico de la dinámica de erosión en los suelos debido a los cambios en el uso de la tierra. *Mapping* (94):32–51 (2004)
- ROGERS, J.D., NICHOLS, T., EMMERICH, T., LATEK, M., Y CIOFFI-REVILLA, C. Modeling scale and variability in human–environmental interactions in Inner Asia. *Ecological Modelling* **241**:5–14 (2012)
- ROUBIK, D.W., MORENO, P. *et al.* Pollen and spores of Barro Colorado Island [Panama]. *Pollen and spores of Barro Colorado Island [Panama]*. **36** (1991)
- RUDDIMAN, W.F. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic change* **61**(3):261–293 (2003)
- RUDDIMAN, W.F. Y ELLIS, E.C. Effect of per-capita land use changes on Holocene forest clearance and CO 2 emissions. *Quaternary Science Reviews* **28**(27):3011–3015 (2009a)
- RUDDIMAN, W.F. Y ELLIS, E.C. Effect of per-capita land use changes on Holocene forest clearance and CO2 emissions. *Quaternary Science Reviews* **28**(27-28):3011–3015 (2009b)
- SANCHEZ, I.B. Y ALONSO, C.L. *Deforestation research progress*. Nova Science (2008)
- SANDERS, W.T., PRICE, B.J., Y SANDERS, W.T. *Mesoamerica: the evolution of a civilization*, tomo 149. Random House New York (1968)
- SANGERMANO, F., EASTMAN, J.R., Y ZHU, H. Similarity Weighted Instance-based Learning for the Generation of Transition Potentials in Land Use Change Modeling. *Transactions in GIS* **14**(5):569–580 (2010)

- SCARBOROUGH, V.L. A preclassic Maya water system. *American Antiquity* págs. 720–744 (1983)
- SCHEFFER, M. *Critical transitions in nature and society*. Princeton University Press (2009)
- SCHEFFER, M., CARPENTER, S., FOLEY, J.A., FOLKE, C., Y WALKER, B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* **413**(6856):591–596 (2001)
- SCHEFFER, M., BASCOMPTE, J., BROCK, W.A., BROVKIN, V., CARPENTER, S.R., DAKOS, V., HELD, H., VAN NES, E.H., RIETKERK, M., Y SUGIHARA, G. Early-warning signals for critical transitions. *Nature* **461**(7260):53–59 (2009)
- SIEMENS, A.H. Y PULESTON, D.E. Ridged fields and associated features in southern Campeche: new perspectives on the lowland Maya. *American Antiquity* **37**(2):228–239 (1972)
- SMITH, M.E. Classic Maya settlement clusters as urban neighborhoods: a comparative perspective on low-density urbanism. *Journal de la Société des Américanistes* págs. 51–73 (2011)
- SOARES-FILHO, B., MOUTINHO, P., NEPSTAD, D., ANDERSON, A., RODRIGUES, H., GARCIA, R., DIETZSCH, L., MERRY, F., BOWMAN, M., HISSA, L., SILVESTRINI, R., Y MARETTI, C. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc Natl Acad Sci U S A* **107**(24):10821–6 (2010)
- SOARES-FILHO, B.S., NEPSTAD, D.C., CURRAN, L.M., CERQUEIRA, G.C., GARCIA, R.A., RAMOS, C.A., VOLL, E., McDONALD, A., LEFEBVRE, P., Y SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* **440**(7083):520–3 (2006)
- SOARES-FILHO, B., RODRIGUES, H., Y FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling & Software* **43**:80–87 (2013)
- SOARES-FILHO, B.S., ASSUNCAO, R.M., Y PANTUZZO, A.E. Modeling the Spatial Transition Probabilities of Landscape Dynamics in an Amazonian Colonization Frontier. *BioScience* **51**(12):1059–1067 (2001)
- SOARES-FILHO, B.S., CERQUEIRA, G.C., Y PENNACHIN, C.L. DINAMICA- a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* **154**:217–235 (2002)
- SOLÍS-CASTILLO, B., ORTIZ-PÉREZ, M.A., Y SOLLEIRO-REBOLLEDO, E. Unidades geomorfológico-ambientales de las Tierras Bajas Mayas de Tabasco-Chiapas en el río Usumacinta: Un registro de los procesos aluviales y pedológicos durante el Cuaternario. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* **66**(2):279–290 (2014)

- SOTO PINTO, L., ANZUETO MARTÍNEZ, M.D.J., Y QUECHULPA, S. *El acahual mejorado un prototipo agroforestal*. EE/631.582097275 S6 (2011)
- SPRINGS, K.D. Y LITT, M. Civilization, Transformation and Collapse. *Journal of World Anthropology: Occasional Papers* **III (I)**:97–112 (2007)
- STEFFEN, W., SANDERSON, R.A., TYSON, P.D., JÄGER, J., MATSON, P.A., MOORE III, B., OLD-FIELD, F., RICHARDSON, K., SCHELLNHUBER, H.J., TURNER, B.L. *et al.* *Global change and the earth system: a planet under pressure*. Springer Science & Business Media (2006)
- STUIVER, M., REIMER, P., Y REIMER, R. CALIB 5.1.0. and 6.0 [WWW Program and Documentation]. *Research and Collections Centre, Springfield* (2011)
- SUÁREZ GIMÉNEZ, M.C. *Metodología de cálculo del factor topográfico, LS, integrado en los modelos Rusle y Usped. Aplicación al arroyo del lugar, Guadalajara (España)*. Tesis Doctoral, Montes (2008)
- TACHER, S.I.L. Y RIVERA, J.R.A. El aprovechamiento agrícola intensivo de los Hubchés (Acahuals o comunidades secundarias) de Yucatán. *Revista Geográfica* págs. 79–103 (2000)
- TAKADA, T., MIYAMOTO, A., Y HASEGAWA, S.F. Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications. *Landscape Ecology* **25**(4):561–572 (2009)
- TORRES, R., GASPARRI, N.I., BLENDINGER, P.G., Y GRAU, H.R. Land-use and land-cover effects on regional biodiversity distribution in a subtropical dry forest: a hierarchical integrative multi-taxa study. *Regional environmental change* **14**(4):1549–1561 (2014)
- TORRESCANO-VALLE, N. Y ISLEBE, G.A. Holocene paleoecology, climate history and human influence in the southwestern Yucatan Peninsula. *Review of Palaeobotany and Palynology* **217**:1–8 (2015)
- TURNER, B. L., N. Y SABLOFF, J.A. Classic Period collapse of the Central Maya Lowlands: insights about human-environment relationships for sustainability. *Proc Natl Acad Sci U S A* **109**(35):13908–14 (2012)
- TURNER, B.L. Population reconstruction for the Central Maya Lowlands: 1000 BC to AD 1500. *Pre-columbian population history in the Maya lowlands* págs. 301–324 (1990)
- TURNER, B.L., GEOGHEGAN, J., Y FOSTER, D.R. *Integrated land-change science and tropical deforestation in the southern Yucatán. Final frontiers*. Oxford University Press (2004)
- TURNER, B., VILLAR, S.C., FOSTER, D., GEOGHEGAN, J., KEYS, E., KLEPEIS, P., LAWRENCE, D., MENDOZA, P.M., MANSON, S., OGNEVA-HIMMELBERGER, Y., PLOTKIN, A.B., SALICRUP, D.P.,

- CHOWDHURY, R.R., SAVITSKY, B., SCHNEIDER, L., SCHMOOK, B., Y VANCE, C. Deforestation in the southern Yucatán peninsular region: an integrative approach. *Forest Ecology and Management* **154**(3):353 – 370 (2001). New Directions in Tropical Forest Research
- TURNER II, B.L. Prehistoric intensive agriculture in the Mayan lowlands. *Science* **185**:118–124 (1974)
- VAN DER WAL, H., GOLICHER, J.D., CAUDILLO CAUDILLO, S., Y VARGAS DOMÍNGUEZ, M. Plant densities, yields and area demands for maize under shifting cultivation in the Chinantla, Mexico. *Agrociencia* **40**(4):449–460 (2006)
- VÁZQUEZ, G., SOLÍS, B., SOLLEIRO-REBOLLEDO, E., GOGUITCHAICHVILI, A. *et al.* Mineral magnetic properties of an alluvial paleosol sequence in the Maya Lowlands: Late Pleistocene–Holocene paleoclimatic implications. *Quaternary International* **418**:10–21 (2016)
- VELÁZQUEZ, A., MAS, J.F., GALLEGOS, J.R.D., MAYORGA-SAUCEDO, R., ALCÁNTARA, P., CASTRO, R., FERNÁNDEZ, T., BOCCO, G., EZCURRA, E., Y PALACIO, J. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica* (62):21–37 (2002)
- VELDKAMP, A. Y VERBURG, P.H. Modelling land use change and environmental impact. *J Environ Manage* **72**(1-2):1–3 (2004)
- VERBURG, P.H., DE GROOT, W.T., Y VELDKAMP, A.J. Methodology for multi-scale land-use change modelling: Concepts and challenges. En A.J. Dolman, A. Verhagen, y C.A. Rovers (editores), *Global Environmental Change and Land Use*, págs. 17–51. Springer Netherlands (2003)
- VILLALOBOS-ZAPATA, G.J. Y MENDOZA VEGA, J. La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México* (2010)
- VILLERS-RUIZ, L. Y TREJO-VÁZQUEZ, I. Impacto del cambio climático en los bosques y áreas naturales protegidas de México. *Interciencia* **23**(1):10–19 (1998)
- VIVEIROS DE CASTRO, E. Y LÉVI-STRAUSS, C. Perspectivismo y multinaturalismo en la América indígena. *Tierra adentro: Territorio indígena y percepción del entorno* págs. 37–79 (2004)
- VÁZQUEZ LÓPEZ, V. Entre Río Bec y Calakmul: Algunas reflexiones sobre patrón de asentamiento y organización sociopolítica. En *XXI Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*, págs. 300–312. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Guatemala (2008)
- WAHL, D., SCHREINER, T., BYRNE, R., Y HANSEN, R. A Paleoecological Record from a Late Classic Maya Reservoir in the North Petén. *Latin American Antiquity* **18**(2):212–222 (2007)

- WAINWRIGHT, J. Can modelling enable us to understand the rôle of humans in landscape evolution? *Geoforum* **39**(2):659–674 (2008)
- WEBSTER, D. Y WEBSTER, D. *The fall of the ancient Mayasolving the mystery of the Maya collapse.* Y/305.8 W4 (2002)
- WILLEY, G.R. Problems concerning prehistoric settlement patterns in the Maya lowlands. *Prehistoric settlement patterns in the New World* págs. 107–114 (1956)
- WILLIAMS, M. Dark ages and dark areas: global deforestation in the deep past. *Journal of Historical Geography* **26**(1):28–46 (2000)
- WOLF, E.R. *Pueblos y culturas de Mesoamérica*, tomo 81. Ediciones Era (1967)
- WYMAN, M.S. Y STEIN, T.V. Modeling social and land-use/land-cover change data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize. *Applied Geography* **20**:329–342 (2010)
- XOLOCOTZI, E.H. La agricultura tradicional en México. *Comercio exterior* **3**(8) (1988)
- YAN, M., WANG, Z., KAPLAN, J., LIU, J., MIN, S., Y WANG, S. Comparison between reconstructions of global anthropogenic land cover change over past two millennia. *Chinese Geographical Science* **23**:131–146 (2013)
- YOFFE, N. Y COWGILL, G.L. *The collapse of ancient states and civilizations.* University of Arizona Press (1991)
- YOFFEE, N. Y COWGILL, G.L. *The collapse of ancient states and civilizations.* University of Arizona Press (1991)
- YU, Y., GUO, Z., WU, H., Y FINKE, P.A. Reconstructing prehistoric land use change from archeological data: Validation and application of a new model in Yiluo valley, northern China. *Agriculture, ecosystems & environment* **156**:99–107 (2012)
- ZAMORA, O.M.F. El colapso Maya. *Anuario de Estudios Centroamericanos* págs. 489–507 (1978)
- ZETINA GUTIÉRREZ, M.D.G. De la agroecología Maya a la arqueología demográfica: ¿Cuántas casas por familia? *Estudios de cultura Maya* **XXXVIII**:97–120 (2009)
- ZHANG, X., QIAN, Y., Y CAO, C. Effects of straw mulching on maize photosynthetic characteristics and rhizosphere soil micro-ecological environment. *Chilean journal of agricultural research* **75**(4):481–487 (2015)